DICIEMBRE 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



AUTISMO
Terapias alternativas, un camino incierto

ENERGIA
Hojas artificiales que aprovechan el sol

ETOLOGIA
Inteligencia de simios y delfines

FISICA
La teoría unificadora de Stephen Hawking

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

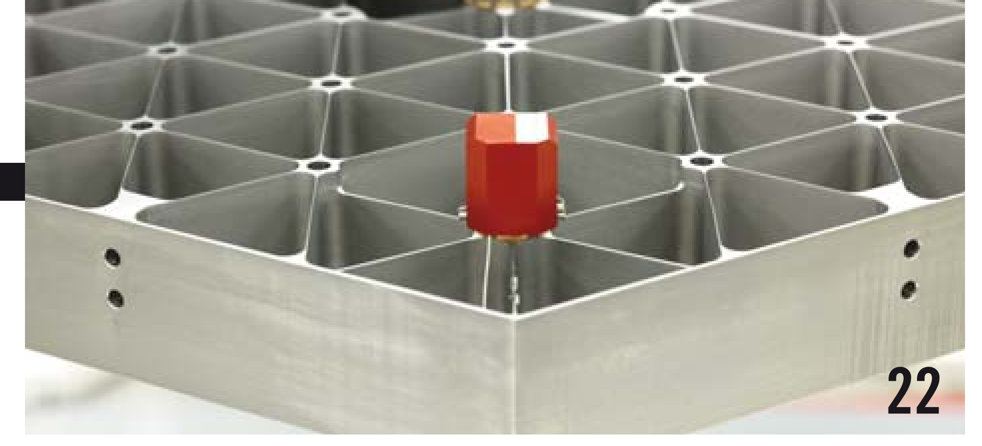
EVOLUCION HUMANA

Más lenta de lo que se pensaba

00411
9 770210 136004

SUMARIO

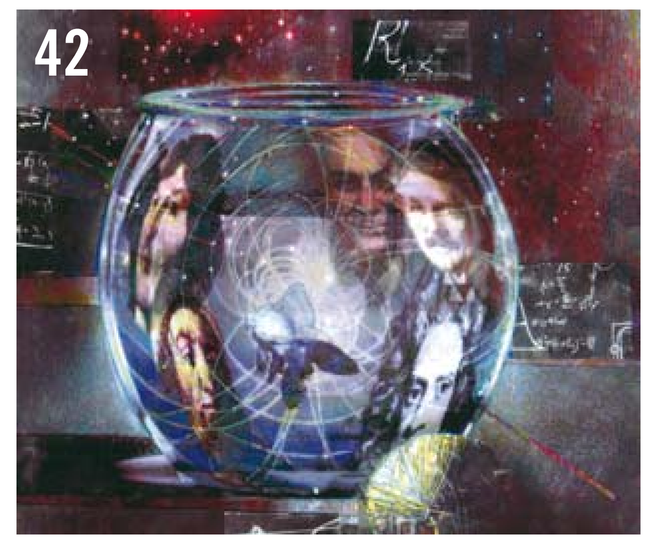
Diciembre de 2010/ Número 411



El James Webb será el primer telescopio de una nueva generación.



Las nuevas técnicas de estudio del genoma ayudarán a determinar las causas genéticas de las principales enfermedades.

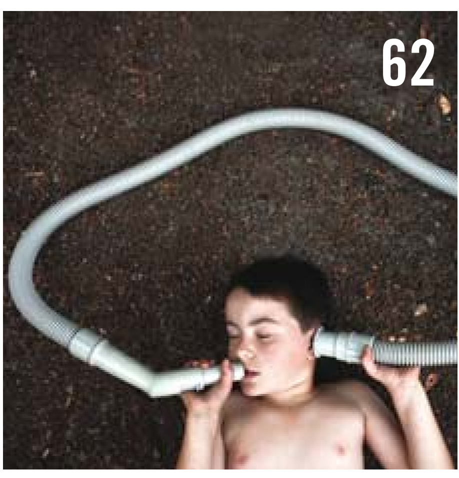


Una nueva manera de entender las teorías de la naturaleza.

ARTICULOS



En el ser humano, la selección natural se habría producido a un ritmo más lento del que se pensaba.



El autismo carece aún de tratamientos eficientes.



Las rizaduras de oleaje fosilizadas indican que el dinosaurio nadó a contracorriente.

SECCIONES

INVESTIGACION
Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

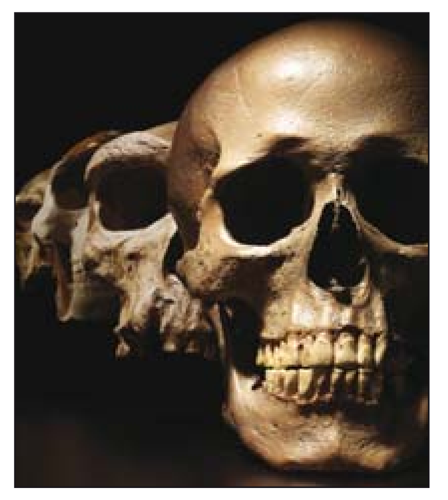
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Alejandra Delprat: *Genética de la evolución*; Yago Ascasibar: *El próximo observatorio espacial*; Juan Manuel González Mañas: *Revolución aplazada*; Daniel Cremades: *La (escurridiza) teoría del todo*; Luis Bou: *El calendario chino, Etica para robots, Hojas artificiales* y *Apuntes*; Ignacio Navascués: *En busca de una cura para el autismo*; Joandomènec Ros: *Tamaño cerebral e inteligencia* y *Una ventosa sensacional*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Apuntes*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Patentes genéticas*; J. Vilardell: *Hace...*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Fotografía de Craig Cutler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euros	120,00 euros
Resto del mundo	100,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



Copyright © 2010 Scientific American Inc., 75 Varick Street, New York, NY 10013-1917.

Copyright © 2010 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

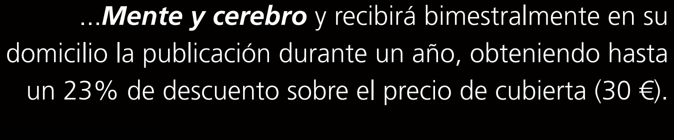
Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

www.INVESTIGACIONYCIENCIA.es

SUSCRIBASE A...

...***Investigación y Ciencia*** y recibirá puntual y cómodamente en su domicilio doce ejemplares por el precio de once (65 €).

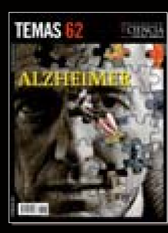


...***Mente y cerebro*** y recibirá bimestralmente en su domicilio la publicación durante un año, obteniendo hasta un 23% de descuento sobre el precio de cubierta (30 €).









Además, con la suscripción a *Investigación y Ciencia*, le obsequiamos con 2 ejemplares a elegir de la serie *TEMAS*.
(Consulte los títulos en nuestra página web.)

Contacto
Teléfono: 934 143 344
administracion@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Y en nuestra web podrá encontrar:

- **Hoy destacamos** Cada día, reseña de un trabajo científico de actualidad
- **Retazos de ciencia** Selección de apuntes científicos
- **Artículo gratis** Cada mes, un artículo completo y gratuito en formato PDF
- **Hemeroteca** Donde consultar todas nuestras revistas
- **Tienda** Para adquirir nuestros productos y promociones
- **Blogs** Espacios de reflexión científica
- **Boletines** Servicio gratuito de boletines informativos



Ahora también disponible en versión **DIGITAL**.
Ejemplares de IyC disponibles desde 1996 a la actualidad y el archivo completo de MyC.



La vida, el multiverso y todas las cosas

En "Buscando vida en el multiverso" (marzo 2010), Alejandro Jenkins y Gilad Pérez afirmaban que sería posible la vida en un universo sin la interacción nuclear débil. Pero olvidan señalar que la interacción débil es única en cuanto al tratamiento asimétrico de la materia y la antimateria. Sólo por existir esa asimetría, la materia se sobrepuso ligeramente a la antimateria antes de que casi toda la antimateria fuera aniquilada por una cantidad igual de materia en los primeros segundos transcurridos desde la gran explosión primigenia. Todo lo que vemos, incluidas las estrellas, que son esenciales para la vida, está compuesto por ese ligero exceso de materia. Un universo desprovisto de la interacción débil asimétrica prácticamente carecería de materia normal y, por consiguiente, de cualquier forma de vida que pudiéramos reconocer.

Robert L. Piccioni
Autor de *Everyone's Guide to Atoms, Einstein, and the Universe*

RESPONDEN LOS AUTORES: *Por sí misma, la interacción nuclear débil no puede distinguir entre materia y antimateria, dado que conserva la simetría de la paridad de carga (CP, en siglas inglesas), es decir, trata del mismo modo a una partícula que a la imagen especular de la antipartícula correspondiente. Como indica Piccioni, sin embargo, es posible combinar la interacción débil con otras interacciones de tal modo que se destruya esta simetría CP.*

Sabemos hoy que la asimetría CP es demasiado pequeña para explicar el hecho de que el universo contenga tal cantidad de materia, pero ninguna antimateria. Para resolver este fascinante enigma se necesitan nuevas interacciones físicas a energías elevadas, hasta ahora no descubiertas. Esas otras interacciones podrían además producir un exceso de la materia sobre la antimateria en un universo carente de interacción débil. No hemos tratado este tema en nuestro artículo por limitaciones de espacio.

Reconocimiento debido

Por haber examinado desde 1987 la repercusión biológica del H_2S, consideramos que el artículo de Rui Wang "La función dual del sulfuro de hidrógeno" adolece de inexactitudes y omisiones esenciales. Ya en 1987, nuestro grupo describía algunos de los efectos neuroquímicos del sulfhidrato de sodio (NaHS), precursor del H_2S. Hacia 1990 habíamos señalado la presencia en los tejidos de niveles endógenos detectables y debatíamos sobre los posibles efectos biológicos de la exposición crónica a concentraciones subletales de NaHS, entre ellos la regulación de los niveles de aminoácidos neurotransmisores. En aquel momento, ya habíamos apuntado la posibilidad de una protección neuronal por medio del H_2S. Sin duda, Wang conocía estos trabajos pues citaba varios de esos documentos en una revisión que publicó en 2002. Por aquel entonces, otro grupo dirigido por Sheldon Roth, de la Universidad de Calgary, estudiaba también los efectos del H_2S sobre el sistema respiratorio.

Samuel B. Kombian
Facultad de Farmacia, Universidad de Kuwait
William F. Colmers
Profesor de farmacología, Universidad de Alberta

Wang pretende haber iniciado los estudios sobre el H_2S a partir de sus propias ideas, lo cual es sencillamente falso. En 1996, ya habíamos publicado Kazuho Abe y yo el primer informe sobre los posibles efectos biológicos del H_2S y demostrado que la cistationina-beta-sintasa (CBS) produce sulfhídrico a partir de la cisteína del cerebro, y que ese H_2S facilita que se produzca una potenciación a largo plazo del hipocampo al intensificar la actividad de los receptores.

También reivindica Wang "la decisión de examinar una enzima llamada cistationina-gamma-liasa (CSE)... que nadie había descubierto en los vasos sanguíneos". En 1997, Rumiko Hosoki, Norio Matsuki y yo habíamos publicado nuestro segundo trabajo sobre el H_2S; allí demostrábamos que el CSE se expresa en la aorta torácica, el íleon y la vena portal, y produce H_2S a partir de la cisteína. También señalábamos que el H_2S relaja esta musculatura lisa. Wang conocía esos trabajos, puesto que se refirió a ellos en 2001, cuatro años más tarde.

Hideo Kimura
Instituto Nacional de Neurociencia, Tokio

RESPONDE WANG: *Mi artículo no pretendía ser una exposición académica sobre el descubrimiento de los efectos biológicos del sulfhídrico. No menciona numerosos hallazgos importantes, pero en modo alguno cuestiona o menosprecia tales contribuciones, incluidas las de Kimura. Teniendo en cuenta las estrictas limitaciones de espacio y los lectores habituales de* Scientific American, *describí honestamente cómo se desarrolló mi interés personal sobre el tema. No obstante, en el proceso de redacción y revisión se perdieron algunas descripciones relevantes. Por ejemplo, a poco de enviar a imprimir el artículo, introduje en el texto la corrección siguiente (revisión en negritas): **"Ciertos estudios anteriores realizados por Hideo Kimura en Japón** sugerían que el H_2S fuese un neuromodulador que regularía la sensibilidad de los circuitos neuronales ante los estímulos". Por desgracia, se me comunicó que no había espacio para hacer la modificación.*

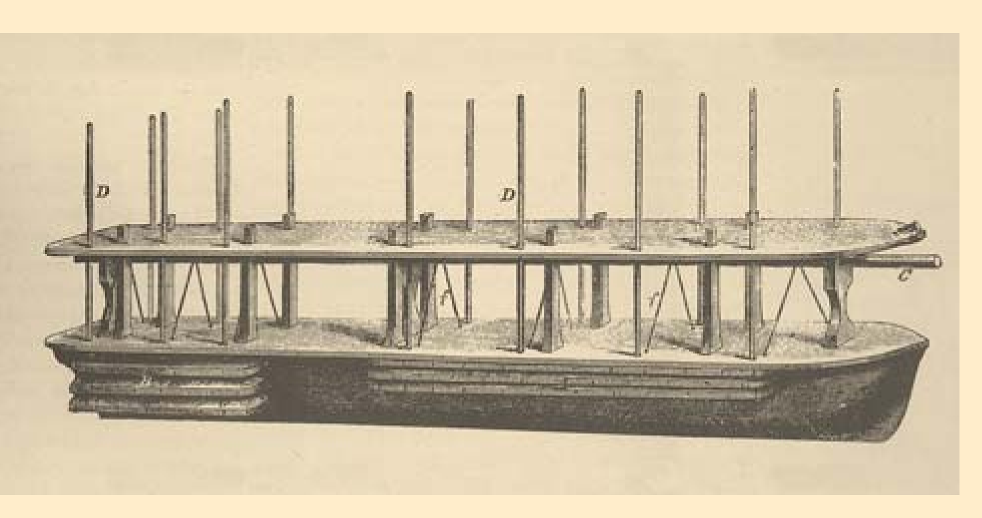
*En cuanto al comentario de Kimura sobre la presencia de CSE en los vasos sanguíneos, en una corrección enviada al redactor escribí lo siguiente: "Pero nadie había descubierto **la misma** enzima en los vasos sanguíneos. Allí la identificó nuestro grupo **y la clonamos.**" Las palabras en negrita son importantes para señalar nuestra especial contribución, pero fueron omitidas del texto por un malentendido entre el redactor y yo. Por supuesto, Kimura y sus colaboradores demostraron anteriormente que el H_2S relaja los vasos sanguíneos, pero ello no nos impedía a nosotros ni a nadie argumentar que el sulfhídrico pueda tener un efecto similar al óxido nítrico.*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Evolución y conducta. «Las gaviotas viven en bandadas. Se alimentan en grupo todo el año y juntas anidan en la época de cría. Ninguna fuerza ni influjo las impulsa a comportarse así; se reúnen y permanecen juntas porque se relacionan unas con otras. Su conducta gregaria y a menudo cooperativa tiene lugar merced a la comunicación. Cada individuo exhibe un repertorio distintivo de llamadas, posturas, movimientos y despliegue de colores que provoca la respuesta apropiada en otros miembros de su especie. Como las diferencias entre esas aves tan estrechamente emparentadas no están inducidas por el entorno, sino que son realmente innatas, resultó claro que las actuales diferencias entre las especies debieron surgir por divergencia evolutiva.
—N. Tinbergen»

NOTA: *Nikolaas Tinbergen compartió un premio Nobel en 1973 por sus trabajos acerca del comportamiento social de los animales.*



LA INVENCION DE ABRAHAM LINCOLN para mantener a flote los barcos sobre los bancos de arena, 1860.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. III, N.º 23; 1 DE DICIEMBRE DE 1860

...cien años

Mundo submarino. «En un discurso realizado hace pocos años ante la Asociación Británica para el Progreso de las Ciencias, Sir John Murray, el distinguido oceanógrafo que recientemente visitó Estados Unidos, señaló que ‘los descubrimientos en aguas de alta mar durante el pasado cuarto de siglo han aportado los conocimientos más importantes sobre la naturaleza de nuestro planeta desde los viajes de Colón y Magallanes’. Cuando se llama nuestra atención hacia el hecho de que grandes arrecifes e islas se han formado mediante la actividad de pequeños animales coralinos, no se nos ofrece sino un mero ejemplo de la importancia de los estudios zoológicos en alta mar. Hoy hay centenares de naturalistas trabajando sobre los materiales y datos recogidos por Agassiz, el príncipe de Mónaco y otros exploradores de las profundidades marinas.»

Deshielo informativo. «A causa de las duras tormentas invernales, el gobierno ruso ha visto hasta ahora interrumpido el contacto con Kamchatka durante dos tercios del año. Pero ahora, con la ayuda del telégrafo inalámbrico, aquella región podrá permanecer comunicada con el resto del mundo todo el año. Se ha establecido una sucesión de estaciones y se ofrecen incentivos especiales a los operadores que se hagan cargo de tan aislados puestos.»

...ciento cincuenta años

La patente de Abraham Lincoln. «Hace poco, al cumplir con nuestra habitual ronda de visitas a la Oficina de Patentes, reclamó nuestra atención la maqueta de un procedimiento para mantener barcos a flote, invento nada menos que del Presidente electo de los Estados Unidos. Al pensar que interesaría a un buen número de nuestros lectores contemplar qué suerte de invención brotó de la mente de tan distinguido dirigente, tomamos un ambrotipo de la maqueta [*véase la ilustración*]. Puede que entre nuestros lectores haya miles de mecánicos con capacidad de idear un mejor artefacto para mantener a flote los vapores en las barras, pero, ¿cuántos de ellos podrían competir con éxito por la presidencia?»

La dañina absenta. «Entre los artistas y literatos franceses está ganando terreno una perniciosa afición. Se trata de la absentina, el principio amargo del ajenjo, que es soluble en los licores alcohólicos. Se dice que varios ciudadanos franceses prominentes han caído víctimas de su consumo, y la han denunciado las más altas autoridades médicas del país. Confiamos en que jamás llegue a utilizarse como estimulante en nuestra población. Quien persiste en ello acaba sumido en la estupidez y la parálisis. La ciencia en su sentido más elevado nos enseña que, en general, la apetencia humana por los estimulantes debe combatirse.»

Las maravillas de la coca. «La decocción de las hojas de la coca, un arbusto peruano del género *Erythroxylum*, está despertando interés por su singular poder estimulante. Las hojas masticadas en cantidades moderadas de un cuarto a un tercio de gramo excitan el sistema nervioso y permiten a quienes las consumen efectuar grandes esfuerzos musculares y resistir los efectos de un clima insalubre; además confieren una sensación de alegría y felicidad. Los indios bolivianos y peruanos viajan cuatro días de una vez y sin alimentarse, teniendo como única provisión un saquito de coca. ¡Buena ocasión para quienes comercian con patentes médicas!»

FILOSOFIA DE LA CIENCIA

Hawking y la necesidad de Dios

La reciente publicación de *El gran diseño*, de Stephen Hawking y Leonard Mlodinow, ha levantado polémica: para algunos, la obra se arroga haber demostrado científicamente la inexistencia de Dios. Según los autores, la física puede explicar el origen del universo y por qué las leyes físicas son las que son. El universo surgió "de la nada" por obra de la gravedad, y las leyes de la naturaleza no serían sino un accidente del universo particular en el que nos ha tocado vivir. "Es posible responder a estas cuestiones sin salir del ámbito científico y sin recurrir a ningún ser divino", sostienen.

Algunos teólogos han replicado que, por definición, la existencia de un creador se halla más allá de los límites de la ciencia. Otros tacharon el libro de ingenuo desde un punto de vista filosófico: arguyen que las leyes que causaron la aparición del universo debían existir con anterioridad a la gran explosión y que la "ley de la gravedad" parece ser algo muy diferente de "la nada".

Por su parte, los autores han respondido que su intención jamás fue afirmar que la ciencia demostrase la inexistencia de Dios. "Dios podría existir", afirmó Hawking en un programa de la CNN, "pero la ciencia puede explicar el universo sin la necesidad de un creador". Según Mlodinow: "No afirmamos haber demostrado que Dios no existe; ni siquiera hemos dicho que Dios no haya creado el universo". En cuanto a unas leyes físicas anteriores a la existencia del cosmos, "si alguien desea considerar a Dios como la personificación de la teoría cuántica, no hay problema".

Por otro lado, la explicación científica del origen del universo podría no ser tan completa como los autores dan a entender. En opinión del cosmólogo Marcelo Gleiser, del Dartmouth College, "las teorías a las que recurren Hawking y Mlodinow [la teoría de cuerdas y la aún más misteriosa teoría M] vienen a gozar de tantas pruebas empíricas como la existencia de Dios". Leonard Susskind, físico teórico de la Universidad de Stanford y cuyo libro *El paisaje cósmico: teoría de cuerdas y el mito del diseño inteligente* (2006) también cuestionaba la necesidad de un creador, reconoce que no todos los físicos creen haber encontrado una teoría completa: "Diría que no estamos ni cerca de conseguirlo". Exista Dios o no, sus obras resultan difíciles de comprender.

—*Davide Castelvecchi*



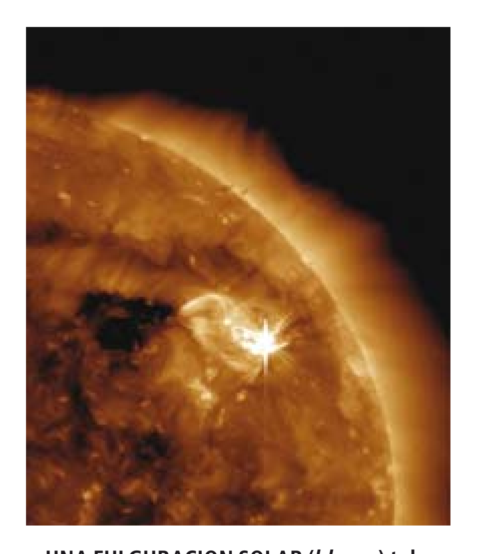
FISICA SOLAR

Un Sol demasiado tranquilo

La actividad solar, con sus fulguraciones, eyecciones de masa coronal y otros fenómenos energéticos, aumenta y disminuye en ciclos de 11 años. Las manchas solares, indicadores de la actividad magnética de la superficie solar, proporcionan una prueba visual de dicho ciclo: durante los máximos de actividad podemos ver un gran número de ellas, mientras que en los mínimos desaparecen casi por completo. Pero parece que el comportamiento de nuestra estrella no es tan predecible como se creía. El último mínimo solar, a finales de 2008, sorprendió por largo y tranquilo. Si bien los registros de actividad solar con los que cuentan los astrónomos incluyen sólo unos pocos ciclos, son varias las indicaciones que apuntan a que el último mínimo fue el más profundo de entre todos los registrados.

Durante la última reunión de la Sociedad Astronómica Americana, el pasado mayo, quedó claro que la explicación del último período de calma aún sigue opaca. David Hathaway, de la NASA, halló que el flujo meridional, una corriente que se desplaza del ecuador solar hacia los polos, fue anormalmente rápido durante el último mínimo. Pero pidió cautela antes de llegar a cualquier conclusión basada en un pequeño número de ciclos.

Otros expertos han recurrido a datos helisismológicos; es decir, los referentes a las oscilaciones acústicas que recorren la superficie del Sol. Los mismos permiten inferir la física de las corrientes solares a miles de kilómetros bajo su superficie. De todos modos, aún es demasiado pronto para saber si dichas predicciones son robustas. Otras líneas de investigación intentan trazar los cambios en el campo magnético, asociados a la variación en el número de manchas, aunque también sin resultados concluyentes. —*John Matson*



UNA FULGURACION SOLAR (*blanco*) tal y como se observa en el ultravioleta extremo. Esta actividad estuvo ausente a finales de 2008, cuando el Sol entró en un mínimo de actividad de duración inusitada.

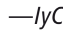
FRANK ZAURITZ *Redux Pictures* (*Hawking*); CORTESIA DEL OBSERVATORIO DE DINAMICA SOLAR Y NASA

EDUCACION MUSICAL

Afinar la mente

En los últimos años, las técnicas de exploración cerebral han permitido examinar los beneficios cognitivos derivados del estudio y práctica de la música. La enseñanza de un instrumento musical desde edades tempranas mejora la capacidad del cerebro para procesar sonidos. Pero los beneficios de esa gimnasia auditiva van más allá: ayudan a mantener la concentración durante otros procesos de aprendizaje en los que interviene el oído (por ejemplo, durante una clase). Además, la capacidad para apreciar las sutilezas en el tono y el tempo ayuda tanto a niños como a adultos en el estudio de otras lenguas.

Recientemente, Nina Kraus, de la Universidad Northwestern, y Bharath Chandrasekaran, de la Universidad de Texas en Austin, analizaban en *Nature Reviews Neuroscience* los beneficios de la educación musical y comentaban sobre la preocupante tendencia a eliminar la música de los planes de enseñanza estadounidenses. Según ellos, de manera similar a como el ejercicio físico ayuda a mantener el cuerpo en forma, la música entrena las cualidades auditivas. Por ello, sería deseable considerar el papel que la música juega en el desarrollo del individuo. Más aún cuando se trata de un objetivo que no requiere grandes recursos económicos.


—IyC

WENDY McMURDO (*arriba*); J. HENRY FAIR (*abajo*)



ECOLOGIA

Lagos de fósforo

La minería del fósforo presenta dos caras, una de ellas benéfica, la otra, ingrata y preocupante. Nos proporciona fosfato amónico, ingrediente principal de los abonos artificiales empleados para aumentar las cosechas, pero también genera grandes masas de detritus.

El fósforo se extrae de una roca que contiene fosfato de calcio. En varios estados norteamericanos se beneficia a cielo abierto, en franjas. El mineral se pulveriza y trata con ácido sulfúrico para obtener ácido fosfórico, en primer lugar, y en un segundo proceso, fosfato amónico. Por cada tonelada de ácido fosfórico producido se generan cinco de fosfoyeso, un subproducto de aspecto terroso, blanco-grisáceo que emite gas radón, por lo que tiene escasas aplicaciones (una de ellas, el cultivo del maní). Casi todo el fosfoyeso se apila, mediante excavadoras, en gigantescos vertederos que pueden alcanzar unos 60 metros de altura y cubrir 100 hectáreas o más. Cada vertedero contiene entre 4000 y 12.000 metros cúbicos de aguas residuales. Estas van escurriéndose gradualmente y originan grandes charcas, que rielan en azul o en verde al reflejarse la luz en los sedimentos lixiviados del fondo. Esta aguas poseen un *p*H de entre 1 y 2, por lo que son fuertemente ácidas y corrosivas. En la fotografía se observa el extremo de uno de estos vertederos, en Florida, y su laguna correspondiente.

Florida produce el 75 por ciento del fósforo utilizado por los agricultores estadounidenses y alrededor del 20 por ciento del total mundial. Más de 1000 millones de toneladas de fosfoyeso yacen apiladas en 25 vertederos repartidos por ese estado, a las que se añaden 28 millones de toneladas cada año.


—Mark Fischetti

La población cantábrica de oso pardo

La huella genética obtenida a partir de muestras no invasivas, como heces y pelos, permite seguir el rastro de los individuos y los genes en la población

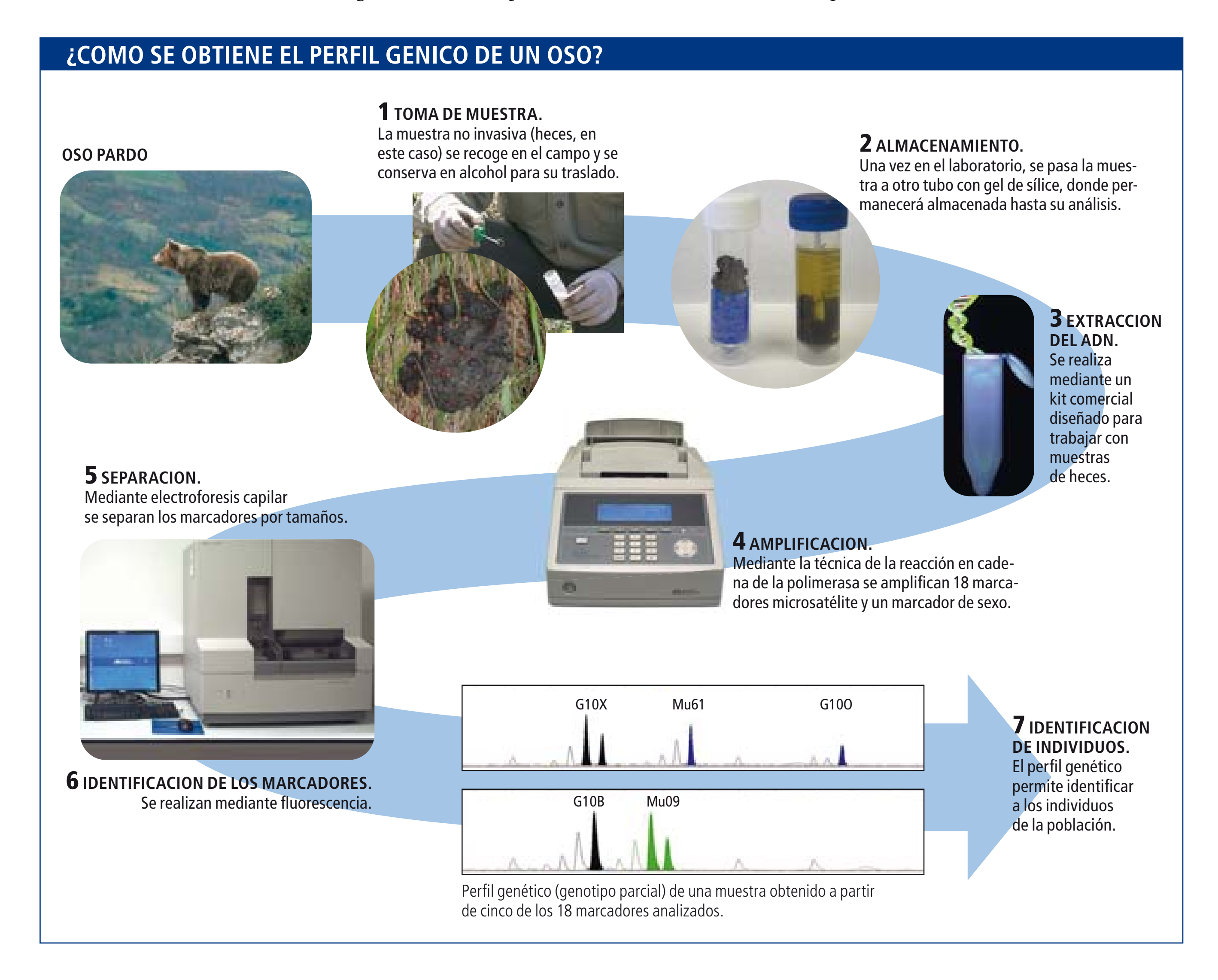
La población cantábrica de oso pardo (*Ursus arctos*) es la única población de osos autóctonos de la península Ibérica. Consta de un centenar de individuos distribuidos en dos subpoblaciones: la oriental (Cantabria, Asturias y Castilla y León) y la occidental, más numerosa y con mejores perspectivas de supervivencia (Galicia, Asturias y Castilla y León).

Debido al reducido censo de su población, el oso se ha considerado una especie en peligro de extinción en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas. Uno de los primeros pasos en la conservación de una especie amenazada consiste en valorar su diversidad genética actual y la distribución de esa diversidad en la población.

Desde finales del año 2004, hemos venido analizando la estructura genética de la población cantábrica, dentro de un convenio con el Principado de Asturias y con la colaboración de la Junta de Castilla y León y el Parque Nacional de los Picos de Europa.

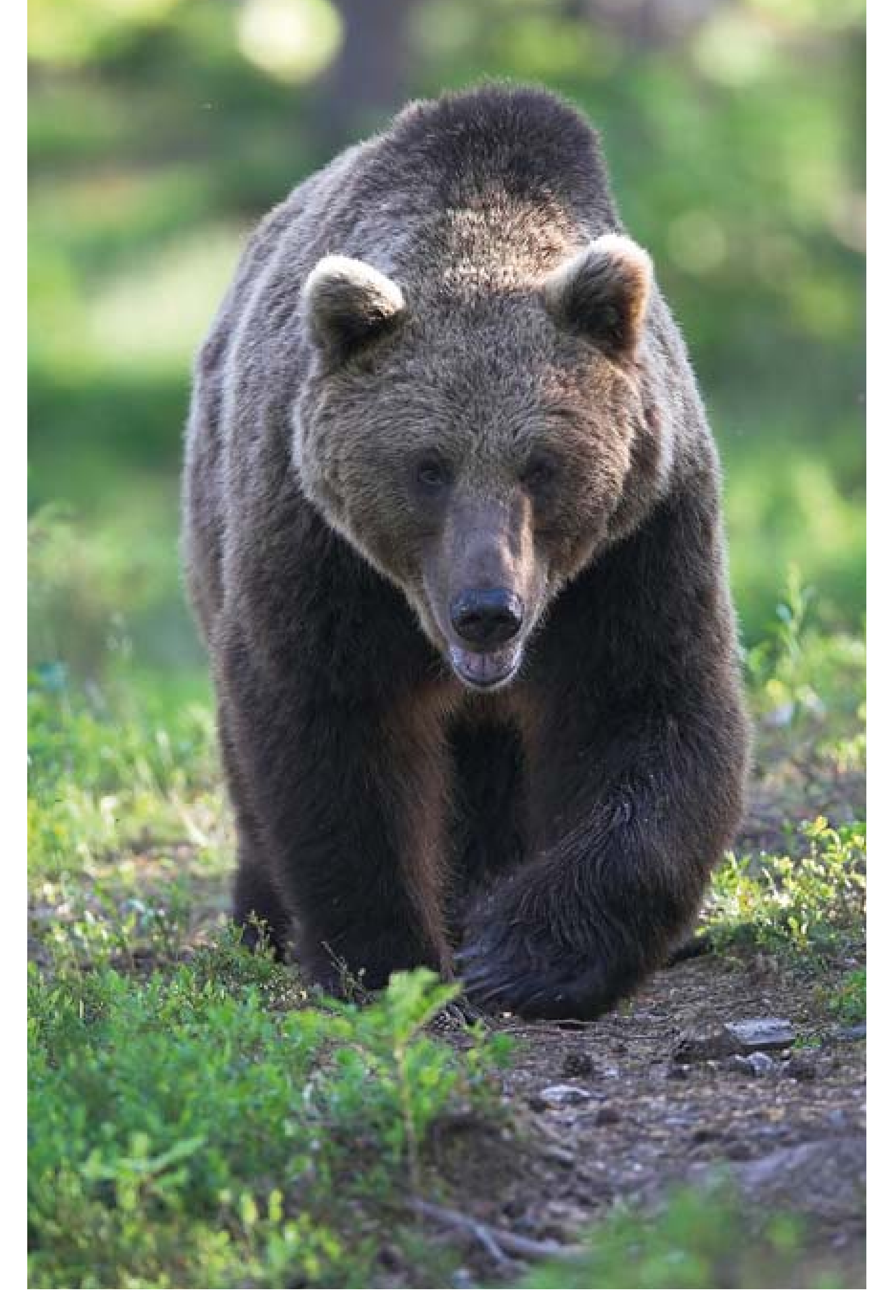
Inicialmente, se pusieron a punto las técnicas de muestreo no invasivo (sin capturar ni molestar el animal) para obtener el ADN de los osos a partir de heces y pelo recogidos en el campo. Una vez extraído el ADN de la muestra, se realizó el perfil genético de los individuos respecto a varios marcadores microsatélite y se estudió la estructura genética de la población. Los marcadores microsatélite son secuencias de ADN altamente polimórficas en las que un fragmento, de uno a seis nucleótidos, se repite de manera consecutiva. La variación en el número de repeticiones crea diferentes alelos. Estos se distinguen entre sí por la longitud total del fragmento, con lo que es posible obtener una huella dactilar genética de cada individuo. Esas técnicas son similares a las empleadas en humanos para la identificación forense y las pruebas de paternidad. Dado que permiten reconocer individuos concretos, se pueden aplicar en los estudios sobre la demo-

¿COMO SE OBTIENE EL PERFIL GENICO DE UN OSO?



Perfil genético (genotipo parcial) de una muestra obtenido a partir de cinco de los 18 marcadores analizados.

1. **LA MIGRACION DEL OSO PARDO** favorece el flujo genético entre las dos subpoblaciones cantábricas de la especie.



© iStockphoto/GRAEME PURDY

grafía y otros aspectos de la biología de la especie. Además, en "genética forense", sirven para descubrir los animales causantes de daños, estudiar casos de infanticidio, etcétera.

Diversidad y estructura genética

La diversidad genética de la población cantábrica es inferior a la descrita en otras poblaciones de oso consideradas en buen estado de conservación. Este hecho tendría su explicación más plausible en la fuerte disminución del tamaño poblacional iniciada hace unos 300 años, cuando la población peninsular de este mamífero quedó restringida al ámbito cantábrico, disminución que se agudizó durante el siglo pasado.

Cuando se analiza la estructura genética de la población, se pone de manifiesto la elevada diferenciación genética entre las subpoblaciones oriental y occidental, separadas por poco más de 30 kilómetros. La distancia genética entre ambas es comparable a la observada en la población no fragmentada de osos de Norteamérica, entre áreas separadas por miles de kilómetros. Este resultado indica que las discontinuidades en el hábitat, como las deforestaciones, las carreteras o las minas, ejercen un efecto más importante en la diferenciación genética que la distancia geográfica.

La diferenciación genética en la región cantábrica no sólo se debe al aislamiento de las subpoblaciones, sino también al tamaño extraordinariamente pequeño de la subpoblación oriental. Esta presenta uno de los valores de diversidad de la especie más bajos hallados en la bibliografía.

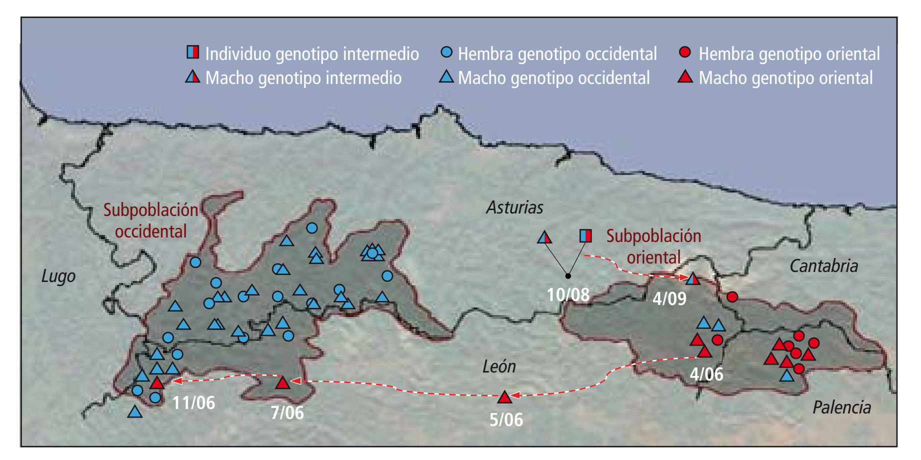
La fragmentación, unida al reducido censo de la población, supone una amenaza para la supervivencia. Para evitar la extinción del oso en la región sería necesario, por un lado, facilitar la conexión entre subpoblaciones y, por otro, impedir la muerte de ejemplares y la destrucción de su hábitat.

Conectividad entre subpoblaciones

Aunque los datos apuntan a una ausencia de intercambio genético entre subpoblaciones desde que quedaron aisladas, hace unos 100 años, en el presente trabajo se ha detectado la migración de individuos entre ambas regiones, todos ellos machos. En concreto, a partir de muestras recogidas entre los años 2004 y 2006, se constató en la zona oriental la presencia de tres individuos con un genotipo correspondiente a la subpoblación occidental. Además, un macho de genotipo oriental que se había identificado en abril de 2006 en su propia área de distribución, se identificó de nuevo en noviembre de 2006 en la zona de Ancares, dentro de la subpoblación occidental. Entre la primera y la última identificación, el mismo individuo fue detectado otras dos veces, de modo que pudimos reconstruir el camino recorrido en su migración hacia el oeste. Tal hallazgo nos ayuda a descubrir posibles corredores naturales sobre los que intensificar los esfuerzos destinados a favorecer la comunicación entre subpoblaciones.

Sin embargo, quedaba aún por determinar si las migraciones observadas eran efectivas en términos de flujo genético, es decir, si los individuos migrantes llegaban a reproducirse. Los cálculos apuntan a que la migración efectiva, aunque escasa (1 o 2 migrantes por generación), sería suficiente para evitar los enormes efectos de la deriva genética en la subpoblación oriental, a pesar de su reducido tamaño.

La existencia de intercambio genético entre ambas subpoblaciones se confirmó hace poco con el hallazgo de dos muestras en Caso (en la zona oriental) a finales del 2008: correspondían



2. Distribución actual del oso pardo en la cordillera Cantábrica y localización geográfica de algunas de las muestras analizadas. Gracias a ellas, se identificaron los individuos migrantes, así como los que presentaron un genotipo intermedio entre el oriental y el occidental.

a dos individuos, posiblemente hermanos (uno macho y otro de sexo no determinado) que presentaban un perfil genético intermedio entre el oriental y el occidental. El macho se detectó además en León en 2009, dentro también de la zona oriental. Sus padres más probables son un macho migrante, procedente de la población occidental y localizado en Fuentes Carrionas, y una hembra oriental localizada en Cantabria.

Mediante el seguimiento de la población, esperamos confirmar que el flujo genético observado entre ambas subpoblaciones no corresponde a un hecho aislado, sino que continuará. En próximos trabajos, mediante el uso de estas técnicas genéticas, nos proponemos ofrecer estimaciones más precisas del tamaño de la población y su evolución en el futuro. Esperamos contribuir así al conocimiento científico indispensable para la recuperación y conservación de esta especie emblemática de los montes cantábricos.

Trinidad Pérez
Universidad de Oviedo
Javier Naves
Estación Biológica de Doñana. CSIC
Ana Domínguez
Universidad de Oviedo

Radiación de Hawking en el laboratorio

Afirman haber detectado la radiación de Hawking inducida por un dispositivo óptico que imita las propiedades de un horizonte de sucesos

Como es bien sabido, un agujero negro se caracteriza por la existencia de un horizonte de sucesos, la frontera de la región de no retorno desde la que nada, tan siquiera la luz, puede escapar. Eso es estrictamente cierto según la teoría clásica. Pero, en 1974, Stephen Hawking demostró que, si se incorporan los efectos de la mecánica cuántica, los agujeros negros sí dejan escapar algo: han de emitir partículas. El espectro de dicha radiación habría de coincidir con lo que en termodinámica se conoce como espectro de emisión de un cuerpo negro (un emisor perfecto).

La radiación de Hawking se debe a la existencia de un horizonte de sucesos. Una manera simplificada de verlo es la siguiente: la teoría cuántica de campos predice que del vacío surgen en todo momento pares virtuales de partículas y antipartículas que se crean y se aniquilan inmediatamente. Pero si uno de esos pares se genera en las proximidades de un horizonte de sucesos y uno de sus miembros lo atraviesa, no podrá regresar jamás. Su compañero no tendrá entonces con quién volver a aniquilarse y quedará convertido en una partícula real. Esas partículas son las que componen la radiación de Hawking.

Hoy en día resulta casi imposible sobrestimar el descubrimiento de Hawking. La radiación que hoy lleva su nombre se ha convertido en un elemento central en lo que a nuestra comprensión de los agujeros negros se refiere. Sin embargo, si bien la misma se tiene por un resultado matemático sólido, nadie ha logrado observarla jamás. En el caso de un agujero negro astrofísico, la radiación de Hawking es tan débil (su temperatura es, como mucho, del orden de milmillonésimas de grado Kelvin) que resulta imposible de detectar.

Pero, desde hace un par de años, algunos físicos experimentales no desisten en su empeño de medir esa radiación. Sus intentos no pasan por crear pequeños agujeros negros en tubos de ensayo, sino que tratan de diseñar sistemas que, sin ser agujeros negros, reproduzcan las propiedades de un horizonte de sucesos.

En fecha reciente, con ese objetivo, un equipo de investigadores de Milán, Como y Edimburgo ha empleado un pulso láser ultracorto que se propaga por un medio transparente. El funcionamiento del dispositivo se basa en que, a su paso, el pulso láser aumenta de manera crucial el índice de refracción del medio.

¿Por qué un experimento así imita las propiedades de un horizonte de sucesos? Supongamos que, después de bombear el pulso, disparamos un haz luminoso. Si la frecuencia del haz es tal que su velocidad de propagación en el medio resulta más rápida que la del láser (en un medio óptico, la velocidad de propagación de la luz depende de la frecuencia), el haz se aproximará al pulso. Pero, dado que en la región que ocupa el pulso láser el índice de refracción es mayor que en el resto del medio, el haz disminuye su velocidad y, de hecho, nunca consigue darle alcance. El pulso láser se comporta como un "tapón" para las ondas de luz que vienen detrás. En la práctica, ese es el comportamiento del ho-

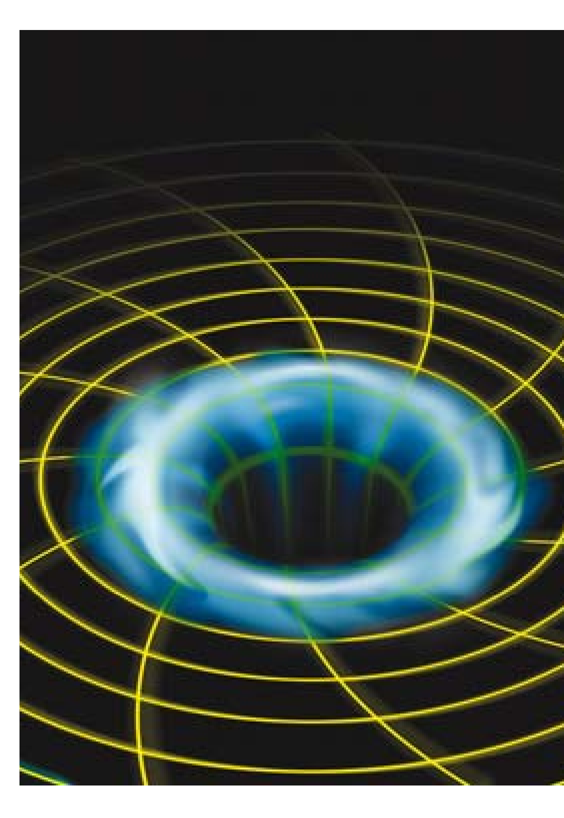
rizonte de sucesos de un "agujero blanco": una región en la cual la luz no puede penetrar.

Las propiedades locales del horizonte de sucesos de un agujero blanco y el de un agujero negro son esencialmente las mismas, por lo que el dispositivo óptico descrito también debería emitir radiación de Hawking. Eso es lo que afirman haber observado Daniele Faccio y sus colaboradores en el trabajo "Hawking radiation from ultrashort laser pulse filaments", publicado en *Physical Review Letters* el mes pasado. Si bien el dispositivo no es nuevo, nunca nadie había observado con anterioridad la radiación de Hawking.

Los autores reconocen la dificultad de discernir entre una emisión de Hawking genuina y la debida a otros mecanismos de emisión en el medio. No obstante, la radiación de Hawking emitida por un dispositivo así presenta ciertas particularidades. Por ejemplo, debido a las propiedades ópticas del medio, su espectro no es igual al de un cuerpo negro. Los investigadores han calculado sus características y afirman haber distinguido un patrón de radiación con las cualidades esperadas. Según explican: "Por un lado, [la emisión detectada] comparte las características de la radiación de Hawking y, por otro, es distinguible de la de otros mecanismos de emisión conocidos. Por tanto, la interpretamos como una indicación de la radiación de Hawking inducida por el análogo del horizonte de sucesos".

No todos los expertos se muestran convencidos del resultado. En cualquier caso, ya hay quien afirma que, en el supuesto de que el efecto consiga reproducirse y se confirme la detección experimental de la radiación de Hawking, el antiguo titular de la Cátedra Lucasiana de la Universidad de Cambridge se convertiría en un claro candidato a recibir el Nobel.


IyC



Patentes de genes

Los genes obtenidos de la naturaleza no son una invención

MATT ZANG (*arriba*); © *iStockphoto*/CHRIS REED (*abajo*)

Hace más de tres decenios, Ananda Chakrabarty, un microbiólogo de los laboratorios de General Electric en Schenectady, Nueva York, desarrolló mediante ingeniería genética una bacteria con capacidad de disolver el petróleo crudo. Cuando solicitó una patente, el examinador rechazó inicialmente su solicitud alegando que los organismos vivos no eran patentables. Más tarde, un tribunal de apelación revocó esa decisión y, en 1980, el Tribunal Supremo de Estados Unidos falló en favor de Chakrabarty.



Durante años, pareció que ese veredicto no traería otras consecuencias. La bacteria de Chakrabarty podía considerarse una invención novedosa, algo totalmente diferente del ADN natural que los tribunales habían valorado en el pasado como no patentable. Con el tiempo, sin embargo, la Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos comenzó a otorgar patentes a los investigadores no sólo por la invención de nuevos organismos, sino también por el hecho de aislar o purificar material genético ya existente.

A mediados de los noventa, la empresa Myriad Genetics, de Utah, obtuvo las patentes de los genes *BRCA1* y *BRCA2*. La existencia de mutaciones en esos genes multiplica por cinco el riesgo de cáncer de mama en las mujeres que los heredan. Las patentes de Myriad convertían a una empresa en la propietaria de genes pertenecientes a miles o millones de mujeres. También permitían a la empresa cobrar cuantiosas sumas de dinero a dos grupos de personas: las mujeres que deseaban someterse a pruebas genéticas para conocer su riesgo de cáncer de mama y los investigadores que querían estudiar esos genes en el laboratorio. Como otros pacientes, Lisbeth Ceriani, madre soltera de Massachusetts que ya había recibido tratamiento para el cáncer de mama, no podía someterse a las pruebas para saber si era portadora del gen porque no podía costear los tres mil dólares exigidos por Myriad.

En 2009, Ceriani junto con otros pacientes, la Unión Estadounidense por las Libertades Civiles y el Colegio Estadounidense de Genética Médica demandó a Myriad e impugnó la validez de sus patentes sobre *BRCA*. Aunque otros tribunales habían respetado con anterioridad el precedente de Chakrabarty, el pasado mes de marzo, Robert W. Sweet, juez de un Tribunal de Distrito de Estados Unidos, revocó siete de las patentes sobre *BRCA*. En su veredicto, el juez Sweet afirmó que la práctica habitual de aislar un gen para convertirlo en paten-

table representaba una artimaña para evitar la prohibición del patentado directo de ADN del cuerpo humano pero que, en la práctica, conseguía el mismo resultado.

Muchos científicos celebraron el veredicto, ya que pensaban que las patentes de genes constituían un obstáculo para la innovación y la investigación independientes. Kenneth Berns, microbiólogo de la Universidad de Florida, piensa que eliminar la protección de las patentes de genes facilitará el desarrollo de tratamientos para enfermedades genéticas y la posibilidad de someterse a pruebas genéticas a precios razonables. Sandra Park, portavoz y asesora legal de la Unión Estadounidense por las Libertades Civiles, opina que el fin de las patentes de genes ayudará a aclarar las opciones de investigación. "Muchos científicos saben que los genes están patentados y no se molestan en emprender trabajos en un área particular", afirma. "Temen que si llegan a encontrar algo médicamente útil, el titular de la patente se interponga", añade.

Myriad planea impugnar el veredicto. "La decisión del juez Sweet crea un mal precedente para la industria biotecnológica", afirma Richard Marsh, vicepresidente ejecutivo y asesor legal de la empresa. "Sin la posibilidad de conseguir una patente, las empresas no invertirán el capital necesario para hacer progresar las investigaciones sobre esos productos de diagnóstico molecular".

El razonamiento a favor del patentado de genes se fundamenta en la necesidad de atraer inversiones. Sin el monopolio que crea la protección por medio de patentes, afirma Bill Warren, especialista en biociencias que trabaja para el bufete Sutherland, de Atlanta, los inversores no aportarán el capital necesario para desarrollar nuevos tratamientos e innovaciones de tipo genético. "En general, las patentes de genes resultan ventajosas y no me gustaría que se excluyeran de forma generalizada", señala.

¿Quién triunfará, la madre naturaleza o la industria biotecnológica? Aún no está decidido. Según Park, la oficina de patentes ha afirmado que, si la apelación de Myriad fracasa, no otorgará nuevas patentes de genes, una medida con amplias consecuencias que probablemente relegaría las patentes de material genético a la historia: "Extraer el ADN de una célula no lo convierte en una invención".

Elizabeth Svoboda

Tamaño foliar

¿Por qué las plantas despliegan hojas tan dispares?

Para realizar la fotosíntesis, todas las plantas cuentan con la misma maquinaria celular, con pequeñas variaciones. Sin embargo, sus estrategias para desplegar el follaje donde albergan esa maquinaria son tremendamente diversas. Las hojas varían en tamaño hasta cinco órdenes de magnitud. Entre las plantas terrestres podemos encontrar desde megáfilos de unos 2500 cm^2 de superficie, como los de algún *Rheum*, hasta hojas extraordinariamente pequeñas, como las de *Galium pyrenaicum*, de unos 0,02 cm^2.

¿Por qué esas enormes diferencias entre especies para realizar una misma función? Algunas observaciones en la naturaleza nos ayudan a responder a esa pregunta. No es lo mismo disponer las hojas a ras de suelo que elevar el follaje varios metros al estilo de los árboles. Igualmente, producir y mantener una hoja en el desierto de Tabernas no exige el mismo esfuerzo que hacerlo en la selva de Irati. O el hecho de pertenecer a la familia de las Rosáceas o de las Leguminosas quizás determine en la planta unos rasgos distintos.

En realidad, la mayoría de las especies cuenta con hojas relativamente pequeñas. Hay pocas especies con tamaños foliares extragrandes. Estudios recientes sugieren que se aplica una penalización fisiológica a las hojas grandes. Desde un punto de vista energético y mecánico, resulta más caro fabricar un centímetro cuadrado de área foliar de una hoja grande que de una hoja pequeña. Hay factores mecánicos y fisiológicos que imponen un límite superior al tamaño foliar. Aun así, este mecanismo nos indica una cota superior, pero no nos ayuda a comprender la gran disparidad de tamaños foliares.

Buena parte de la variabilidad del tamaño foliar entre especies se debe a las necesidades de coordinación entre los rasgos de una planta. Existe así un estrecho compromiso entre el número y el tamaño de las hojas que fabrica un brote: en general, las especies de hojas grandes forman pocas hojas por unidad de tallo, y las de hojas pequeñas son profusas en el número de hojas. Esta última estrategia podría conllevar ventajas adaptativas. Cada hoja lleva asociado un punto de crecimiento en su axila del que puede emerger un nuevo brote. La posesión de numerosos puntos de crecimiento ofrece más flexibilidad en el desarrollo y una mayor capacidad de respuesta ante una pérdida de biomasa. Ello contribuiría a explicar el reducido tamaño foliar en la mayoría de especies. Otros caracteres que influyen en las dimensiones foliares son el tamaño de la planta, la forma de las hojas y su disposición a lo largo del tallo, y el tamaño de la semilla.

¿Cómo influyen las condiciones climáticas en el tamaño foliar? Las hojas funcionan con distinta eficiencia en ambientes diferentes. En las zonas frías el crecimiento celular es lento; las hojas de ambientes alpinos o árticos terminan su desarrollo con pocas células y alcanzan así un tamaño reducido, lo que a su vez las hace más resistentes al frío. La fisiología de las hojas en ambientes áridos nos indica también la importancia de las dimensiones foliares. En la superficie de las hojas grandes se forma una capa de aire inmóvil, relativamente gruesa, que ralentiza el intercambio de vapor de agua con la atmósfera y disminuye la capacidad de disipar calor. Esta lámina es más delgada en las hojas pequeñas, lo cual facilita el enfriamiento y las hace más eficientes en los sitios áridos y cálidos.

Existe, finalmente, otra fuente promotora de variación. Se trata de los factores históricos. Todos los seres vivos compartimos ancestros, y cuanto más









HOJAS DEL MONTE MEDITERRANEO, de diverso tamaño y forma. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: madroño (*Arbutus unedo*), mejorana (*Thymus mastichina*), encina (*Quercus ilex*) y torvisco (*Daphne gnidium*).

cercanos estamos en el árbol de la vida, mayor es el acervo génico común. La tendencia de los organismos emparentados a parecerse entre sí se denomina inercia filogenética. En el caso del tamaño foliar, ¿cómo influirá el hecho de pertenecer a una determinada familia en ese rasgo? ¿Deberán ajustarse las dimensiones foliares de una Rosácea a unos valores determinados? Los escasos trabajos existentes indican que el parentesco entre especies no conlleva necesariamente unos tamaños foliares similares. Pero sí se han detectado, en especies próximas filogenéticamente, tendencias de cambio de ese parámetro asociadas a variaciones ambientales. Es decir, el hecho de pertenecer a una determinada familia botánica limita, aunque sólo de manera modesta, el rango de tamaños foliares que las especies de dicha familia pueden manifestar.

En resumen, las diferencias en el tamaño de las hojas que presentan las especies vegetales responden, al menos, a tres fuentes de variación: la integración con el resto de procesos de la planta, la selección natural ejercida por el medio y los aspectos históricos.

Rubén Milla
Area de Biodiversidad y Conservación
Universidad Rey Juan Carlos
Móstoles





GENETICA DE LA EVOLUCION

La evolución humana reciente habría seguido un camino distinto del que predecían los biólogos

Jonathan K. Pritchard

Hace miles de años, algunos humanos ocuparon por primera vez la meseta tibetana, una vasta extensión de estepa que se eleva 4200 metros sobre el nivel del mar. Aunque esos pioneros tenían la ventaja de colonizar un ecosistema nuevo, sin competir con otros humanos, debieron soportar la baja concentración de oxígeno propia de esa altitud. Como consecuencia, la población sufrió mal de altura crónico y una elevada mortalidad infantil. A principios del presente año, numerosos estudios genéticos identificaron una variante génica, habitual en los tibetanos pero muy infrecuente en otras poblaciones, que modifica la producción de glóbulos rojos. La variante permite explicar la adaptación de los tibetanos a las duras condiciones de su entorno. El descubrimiento, que apareció en los titulares de todo el mundo, constituye un ejemplo extraordinario de la rápida adaptación biológica de los humanos ante unas circunstancias ambientales nuevas. Se calcula que en los últimos 3000 años, un simple instante en términos evolutivos, la variante ventajosa alcanzó una frecuencia muy alta en la población.

Los hallazgos del Tíbet refuerzan la idea de que nuestra especie experimentó sucesivas adaptaciones biológicas desde que salió de Africa, hace unos 60.000 años (las estimaciones varían desde 50.000 hasta 100.000 años), y se extendió por casi todos los ecosistemas terrestres y zonas climáticas del planeta. La aclimatación a la altitud es sólo uno de los numerosos obstáculos ambientales que debió superar *Homo sapiens* cuando migró desde los cálidos pastizales y matorrales del este de Africa hacia las gélidas tundras, la húmeda selva tropical y los tórridos desiertos. De hecho, gran parte de las adaptaciones fueron tecnológicas, como la confección de ropa para combatir el frío. Pero las técnicas prehistóricas por sí solas no bastaron para sobrellevar la escasez de oxígeno en la montaña, los estragos de las enfermedades infecciosas y otros obstáculos ambientales. Ante esas circunstancias, la adaptación debió suceder gracias a la evolución genética y no a las soluciones tecnológicas. Se esperaría, por tanto, que el estudio del genoma humano revelara mutaciones genéticas novedosas transmitidas de una población a otra por la acción de la selección natural (ya que los individuos que portan la mutación tienen más descendientes sanos que sobreviven hasta reproducirse, en comparación con los que no la portan).

Hace seis años que mi equipo empezó a buscar en el genoma humano las huellas de esos imperativos ambientales. Se trataba de averiguar cómo habían evolucionado los humanos desde el inicio de su expansión por el mundo. ¿Hasta qué punto la diferencia genética entre poblaciones de zonas muy dispares responde a la selección natural reciente, que habría obligado a adaptarse a diversas presiones ambientales, como en el caso de los tibetanos? ¿Qué proporción de esas diferencias genéticas no se deben a la selección? Gracias al avance en las técnicas de estudio de la variación genética, podemos abordar esas preguntas.

El trabajo empezó arrojando resultados sorprendentes: en el genoma existen escasos ejemplos de selección natural acelerada. La mayor parte de la selección visible en el genoma debió suceder a lo largo de decenas de miles

CONCEPTOS BASICOS

- Cuando *Homo sapiens* emigró de Africa hace 60.000 años, se encontró con obstáculos ambientales que no podía superar con las técnicas prehistóricas de que disponía.
- Muchos pensaron que el estudio del genoma humano revelaría mutaciones genéticas recientes que se habrían extendido con rapidez por acción de la selección natural, ya que los portadores de la mutación dejan más descendientes sanos que los que no la portan.
- Sin embargo, aunque se demostró que el genoma contiene algunos ejemplos de selección natural acelerada, la mayor parte de la selección detectable parece haber sucedido a un ritmo más lento del que se había previsto.

OWEN GILDERSLEEVE

de años. Tal vez una variante génica ventajosa aumentara su frecuencia en una población, hace mucho tiempo, como respuesta a una presión ambiental local, y a continuación se expandiera a otras poblaciones conforme los humanos iban ocupando nuevos territorios. De este modo, algunas variantes génicas que determinan el color claro de la piel —una adaptación a una menor incidencia de la radiación solar— se distribuyen según antiguas rutas de migración, en vez de seguir la latitud. Las antiguas señales de selección que han persistido a través de milenios a pesar de las nuevas presiones ambientales indican que la selección natural opera a un ritmo mucho más lento de lo que se pensaba. El ejemplo de evolución acelerada de un gen importante en los tibetanos no es, pues, lo habitual.

Aunque se puede afirmar sin ninguna duda que la especie humana continúa evolucionando, conocer el modo en que se producen los cambios resulta más complicado. Los datos indican que en los últimos 60.000 años apenas se ha dado el escenario clásico de selección natural, en el que una mutación beneficiosa se extiende a gran velocidad en una población. Ese mecanismo evolutivo exige presiones ambientales continuas durante decenas de miles de años, una situación poco probable desde que los humanos emprendieron su viaje por el mundo y el ritmo de la innovación tecnológica comenzó a acelerarse.

En el genoma existen escasos ejemplos de selección natural acelerada. La mayor parte de la selección visible en el genoma debió suceder a lo largo de decenas de miles de años.

Los hallazgos están ayudando no sólo a refinar el conocimiento de la evolución humana reciente, sino también a perfilar lo que nos depara el futuro. La selección natural seguramente actúa a un ritmo demasiado lento para que podamos hacer frente a dificultades como el cambio climático y las enfermedades infecciosas, lo que subraya nuestra dependencia de la cultura y la tecnología.

Las huellas de la selección

Hace sólo un decenio no se disponía de las herramientas necesarias para identificar la respuesta genética de nuestra especie a un nuevo ambiente. La secuenciación completa del genoma humano y el consiguiente inventario de las variantes génicas lo cambiaron todo. Para comprender los logros alcanzados, antes es necesario conocer la estructura del ADN y el efecto de pequeños cambios en su funcionamiento. La secuencia del genoma humano contiene alrededor de 3000 millones de nucleótidos o “letras” que sirven como un manual de instrucciones para construir un ser humano. Ahora se sabe que el manual incluye alrededor de 20.000 genes, es decir, cadenas de letras que detallan la información necesaria para sintetizar proteínas. (Las proteínas, entre ellas las enzimas, realizan las principales tareas de la célula.) Alrededor del 2 por ciento del genoma humano codifica proteínas, y una proporción similar participaría en la regulación génica. Sin embargo, se desconoce la función de la mayor parte del genoma.

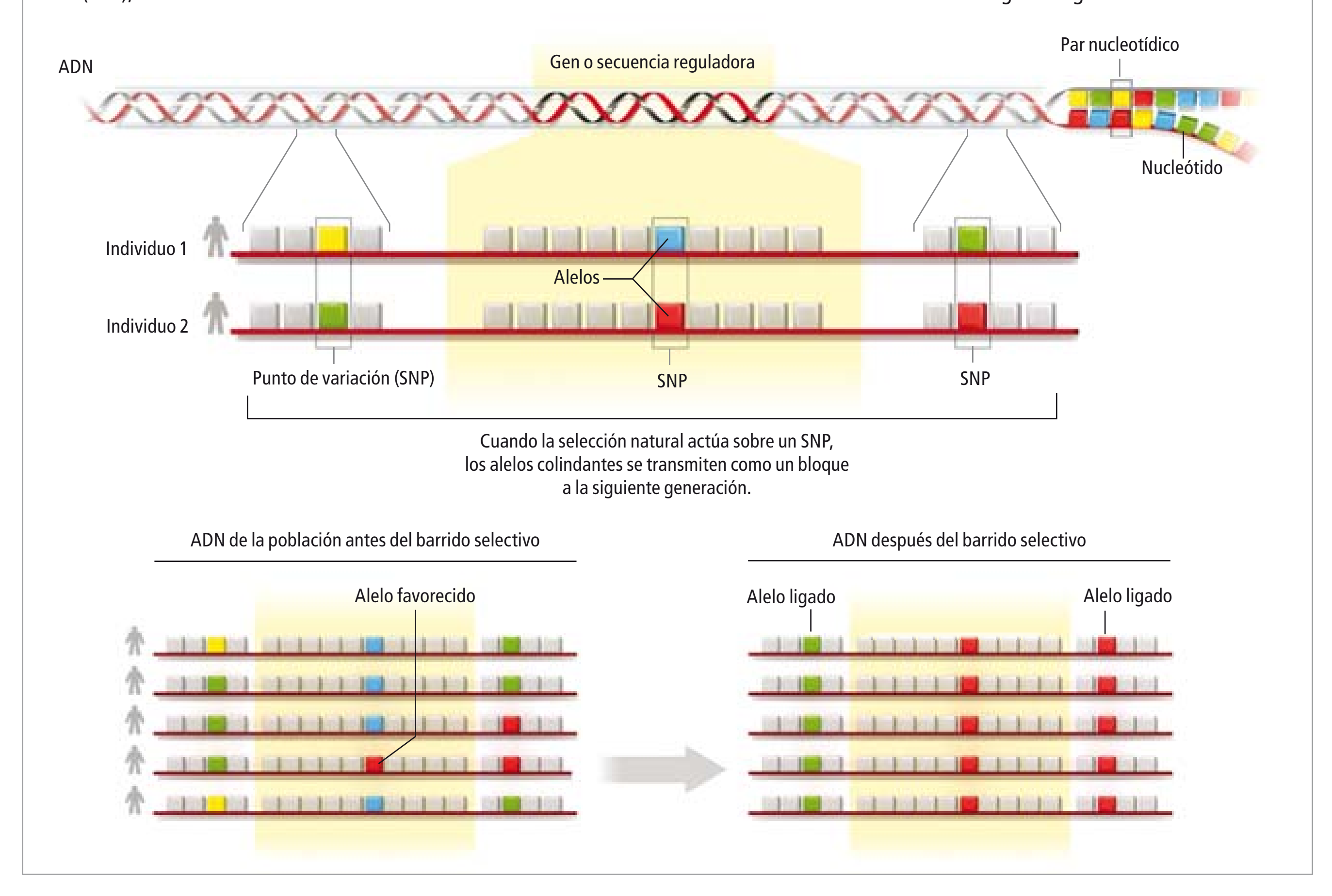
Los genomas de dos personas cualesquiera difieren sólo en uno de cada 1000 pares de bases. Los sitios donde un nucleótido sustituye a otro se denominan polimorfismo de un único nucleótido o SNP (del inglés *single nucleotide polymorphism*); cada versión de un SNP representa un alelo. La mayoría de SNP no suele causar efectos visibles en el individuo, ya que la mayor parte del genoma no codifica proteínas ni genes reguladores. Pero si se produce un SNP en una región del genoma con una función codificadora o reguladora, podrían verse afectadas la estructura y función de la proteína, así como el lugar y la cantidad de la proteína sintetizada. De esta manera, puede que los SNP modifiquen casi cualquier rasgo, como la talla, el color de ojos, la capacidad de digerir la leche o la proclividad a sufrir enfermedades como la diabetes, la esquizofrenia, la malaria y el sida.

Cuando la selección natural favorece un alelo en particular, su frecuencia aumenta en la población con cada nueva generación, en detrimento de los alelos menos útiles, cuya presencia va menguando. Finalmente, si las condiciones ambientales se mantienen estables, el alelo ventajoso se irá transmitiendo hasta alcanzar a todos los individuos, momento en que se habrá fijado en la población. Este proceso suele tener lugar a lo largo de muchas generaciones. Si una persona con dos copias del alelo beneficioso deja un 10 por ciento más de descendencia que los no portadores, y una persona con una sola copia del alelo deja un 5 por ciento más, en promedio el alelo tardará unas 200 generaciones, alrededor de 5000 años, en aumentar del 1 al 99 por ciento su frecuencia en la población. En teoría, un alelo nuevo podrá fijarse en unos cientos de años si le confiere al portador una extraordinaria ventaja adaptativa. Por el contrario, un alelo menos útil tardaría varios milenios en extenderse.

La obtención de muestras de ADN antiguo permitiría identificar los alelos favorecidos a lo largo del tiempo y ayudaría en gran medida a comprender la evolución humana reciente. Pero el ADN suele degradarse con prontitud en las muestras antiguas, lo que imposibilita esta estrategia. Mi equipo y otros hemos desarrollado nuevos métodos para examinar la variación genética en los humanos modernos a partir de las huellas que la selección natural ha dejado en el pasado.

Las señales de la selección

Los investigadores infieren la acción de la selección natural si no observan variabilidad en una región del ADN. Los genomas de dos personas difieren en uno de cada mil pares de nucleótidos, o "letras". Estos puntos de diferencia se conocen como polimorfismos de un único nucleótido (SNP); se denominan alelos a las distintas versiones de nucleótidos en cada SNP. Cuando un alelo particular mejora el éxito reproductivo, se extiende a toda la población y, por tanto, es "seleccionado". Al mismo tiempo, los alelos colindantes se transfieren con el alelo favorecido y aumentan su presencia en la población. El barrido selectivo es la reducción de la variación de SNP en esta región del genoma.



Una de esas tácticas consiste en rastrear, dentro de zonas concretas del genoma, los datos de ADN de diferentes personas de una población con alelos SNP distintos. Cuando una mutación favorable se propaga rápidamente en un grupo como consecuencia de la selección natural, la mutación arrastra un fragmento de cromosoma en un proceso denominado "autoestop genético". Con el tiempo, la frecuencia del alelo beneficioso aumenta en la población, a la par que la de los alelos neutrales del fragmento arrastrado, que apenas afectan la estructura o cantidad de las proteínas en la célula. La reducción o eliminación de la variación de SNP en la región del genoma que contiene el alelo beneficioso se denomina "barrido selectivo". La propagación de determinados alelos por selección natural puede dejar otro patrón distintivo en los datos de SNP: si una población se enfrenta a un nuevo entorno en el que un alelo ya existente resulta útil, éste podrá alcanzar una alta frecuencia en esa población (aunque sea raro en otras poblaciones) sin que por fuerza aparezca en el genoma una señal de autoestop genético.

Numerosos estudios, entre ellos uno publicado por nuestro grupo en 2006, han identificado en los últimos años cientos de señales en el genoma correspondientes a procesos de selección natural sucedidos en los últimos 60.000 años, es decir, desde que *H. sapiens* emigró de Africa. Sólo en algunos de esos casos se tiene una idea clara de las presiones de selección y de las ventajas adaptativas del alelo favorecido. Así, la región del genoma que alberga el gen de la lactasa (enzima que digiere la lactosa, el azúcar de la leche) fue objeto de selección natural en las poblaciones agrícolas productoras de leche de Europa, Oriente Medio y el este de Africa. En la mayoría de poblaciones del mundo, los recién nacidos digieren la lactosa, pero después del destete

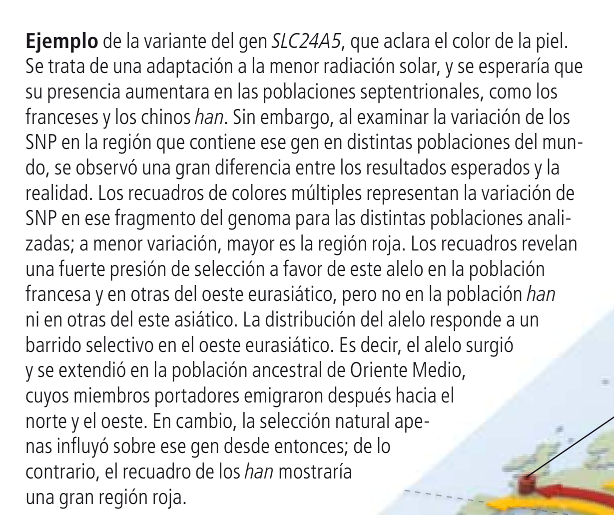
EMILY COOPER

Estudios poblacionales

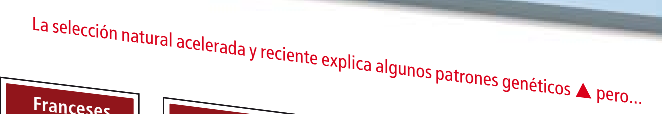
Se ha identificado un conjunto de alelos favorables que alcanzaron una alta frecuencia como consecuencia de una fuerte presión de selección. Esta hizo que en poco tiempo el ser humano se adaptara a las condiciones ambientales locales (*derecha*). El análisis de cientos de señales de selección natural (como los barridos) indica que la mayoría de ellas no se corresponde con adaptaciones recientes. Gran parte de los alelos seleccionados que se identificaron exhibían alguno de los tres patrones geográficos siguientes (*mapa inferior*): habían alcanzado una alta frecuencia en todas las poblaciones de fuera de Africa, pero no existían en ese continente (*flecha naranja*); eran frecuentes en el oeste de Eurasia, un área que comprende Europa y el oeste y sur de Asia, pero infrecuentes en el resto de poblaciones (*flecha roja*); eran dominantes en el norte y este de Asia, Oceanía y América (*flecha amarilla*), pero apenas aparecían en el oeste de Eurasia. Estos patrones hacen pensar que las antiguas rutas de migración influyeron en la distribución de los alelos.

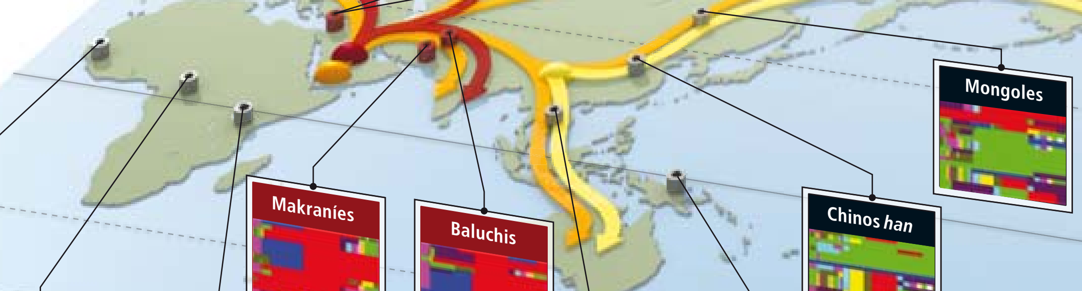
El gen *LARGE*, que participa en la respuesta a la infección del virus de la fiebre de Lassa, ha sido favorecido hace poco por selección natural en una población de Nigeria, donde el patógeno es endémico.

El gen de la enzima lactasa, que digiere el azúcar de la leche, ha experimentado una evolución rápida en las poblaciones agrícola-ganaderas de Europa, Oriente Medio y el este de Africa entre los últimos 5000 y 10.000 años.



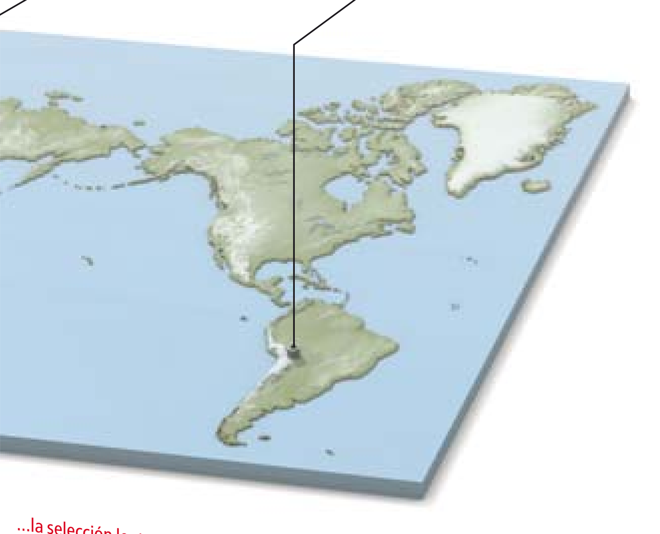
Ejemplo de la variante del gen *SLC24A5*, que aclara el color de la piel. Se trata de una adaptación a la menor radiación solar, y se esperaría que su presencia aumentara en las poblaciones septentrionales, como los franceses y los chinos *han*. Sin embargo, al examinar la variación de los SNP en la región que contiene ese gen en distintas poblaciones del mundo, se observó una gran diferencia entre los resultados esperados y la realidad. Los recuadros de colores múltiples representan la variación de SNP en ese fragmento del genoma para las distintas poblaciones analizadas; a menor variación, mayor es la región roja. Los recuadros revelan una fuerte presión de selección a favor de este alelo en la población francesa y en otras del oeste eurasiático, pero no en la población *han* ni en otras del este asiático. La distribución del alelo responde a un barrido selectivo en el oeste eurasiático. Es decir, el alelo surgió y se extendió en la población ancestral de Oriente Medio, cuyos miembros portadores emigraron después hacia el norte y el oeste. En cambio, la selección natural apenas influyó sobre ese gen desde entonces; de lo contrario, el recuadro de los *han* mostraría una gran región roja.



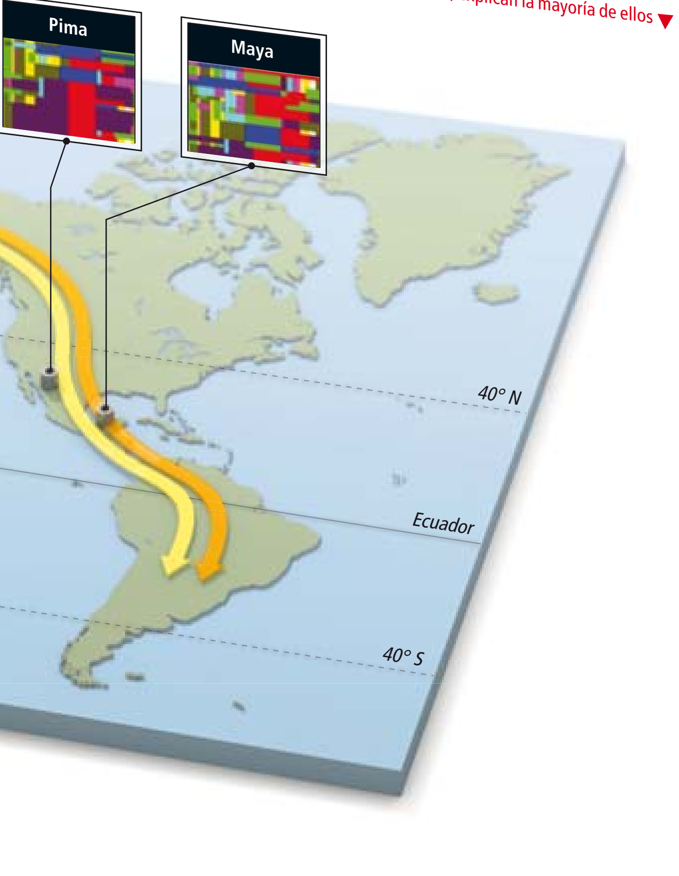


Una variante rara del gen del factor inducible por hipoxia 2-alfa aumentó su frecuencia entre los tibetanos en los últimos milenios y ayudó a mitigar los efectos negativos de vivir a unos 4200 metros sobre el nivel del mar, gracias al ajuste en la producción de glóbulos rojos.

Durante el embarazo, las arterias uterinas de las mujeres que habitan el altiplano boliviano, a 3660 metros de altitud, crecen más deprisa que en las mujeres que viven a nivel del mar. Esta adaptación evolucionó en los últimos diez mil años.



...la selección lenta, junto con las antiguas rutas de migración, explican la mayoría de ellos ▼



EMILY COOPER (*mapas*); FUENTE: "THE ROLE OF GEOGRAPHY IN HUMAN ADAPTATION," POR GRAHAM COOP ET AL., EN *PLOS GENETICS*, VOL. 5, N.º 6; JUNIO DE 2009 (*haplotipos*)

el gen de la enzima se inactiva y aparece la intolerancia a la lactosa propia de la edad adulta. En 2004, un equipo del Instituto Tecnológico de Massachussets publicó un artículo en la revista *American Journal of Human Genetics* en el que describía que las variantes del gen de la lactasa que permanecen activas hasta la edad adulta se habían extendido en las poblaciones europeas de ganaderos lecheros en un período de sólo unos 5000 a 10.000 años. El grupo liderado por Sarah Tishkoff, actualmente en la Universidad de Pensilvania, demostró en 2006 en la revista *Nature Genetics* la rápida evolución del gen de la lactasa en las poblaciones de ganaderos lecheros del este de Africa. Sin duda, esos cambios constituían una respuesta adaptativa a las nuevas prácticas de subsistencia [*véase* "Genes, cultura y dieta", por Olli Arjamaa y Timo Vuorisalo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2010].

Además, se han hallado señales inequívocas de selección en al menos una docena de genes que determinan el color de la piel, el pelo y los ojos en los humanos no africanos. En esos ejemplos también se hace patente la relación entre presión de selección y ventaja adaptativa. Al emigrar de sus asentamientos tropicales, los humanos vieron disminuir la radiación ultravioleta (UV) que recibían del sol. El cuerpo necesita una dosis determinada de radiación UV para sintetizar un nutriente esencial, la vitamina D. En los trópicos, la mayor proporción de rayos UV que alcanza la piel oscura permite sintetizar la cantidad indispensable de vitamina D. No sucede así en altas latitudes, donde la necesidad de vitamina D debió de favorecer la evolución hacia colores de piel más claros; los cambios en los genes, que presentan fuertes señales de selección, hicieron posible el proceso adaptativo.

Las señales de selección han revelado una variedad de genes que confieren resistencia a las enfermedades infecciosas. El grupo de Pardis Sabetis, de la Universidad de Harvard, descubrió una mutación en el gen *LARGE* que ha alcanzado en poco tiempo una alta frecuencia en la tribu yoruba de Nigeria, como respuesta a la fiebre de Lassa que surgió hace poco en esa población.

Señales de selección compuestas

Esos ejemplos y otros pocos demuestran bien a las claras que la selección natural actúa de manera acelerada para promover los alelos beneficiosos. Sin embargo, en la mayoría de los cientos de señales de selección restantes, no se pueden reconocer las circunstancias que favorecieron la expansión de los alelos seleccionados ni el efecto del alelo en los portadores. Hasta hace poco, se interpretaba que esas señales resultaban de barridos selectivos ocurridos durante los últimos 15.000 años. Sin embargo, en nuestros trabajos más recientes, hemos demostrado que, en realidad, la mayoría de esas señales no representan una adaptación reciente y acelerada a las condiciones locales.

En colaboración con la Universidad de Stanford, hemos estudiado un conjunto enorme de datos de SNP obtenidos a partir de muestras de ADN de 1000 individuos de todo el mundo. Cuando observamos la distribución geográfica de los alelos seleccionados, descubrimos que las señales más marcadas pertenecían a uno de tres patrones geográficos. El primero corresponde a barridos genéticos denominados "fuera de Africa", en los que el alelo favorecido y el material arrastrado por autoestop presentan una alta frecuencia en las poblaciones no africanas. Este patrón hace pensar que los alelos adaptativos surgieron y se extendieron después de que la especie humana ya había emigrado de Africa pero todavía estaba limitada a Oriente Medio, hace unos 60.000 años; más tarde, a medida que migraba hacia el norte y el este, los alelos fueron expandiéndose por todo el mundo. Existen otros dos patrones geográficos más

El genoma humano habría experimentado más cambios adaptativos de lo que se pensaba, cambios que el examen clásico del genoma no permite identificar

restringidos: los barridos del oeste de Eurasia, con una alta frecuencia del alelo favorecido en las poblaciones de Europa, Oriente Medio y centro y sur de Asia; y los barridos del este asiático, que extendieron el alelo favorecido entre los asiáticos orientales, los nativos americanos, los melanesios y los papúes. Los dos patrones responden a barridos que debieron de tener lugar poco después de la separación de los eurasiáticos occidentales y asiáticos orientales en su respectivas rutas de migración. (Se desconoce el momento exacto de ese suceso, pero se calcula que fue hace entre 20.000 y 30.000 años.)

De los patrones de barrido se extraen dos observaciones de gran interés: por un lado, los movimientos de las poblaciones en el pasado influyeron profundamente en la distribución de los alelos favorecidos por todo el planeta; por otro, la selección natural apenas ha ajustado esa distribución a las presiones ambientales recientes. Por ejemplo, uno de los responsables de la piel clara es una variante del gen *SLC24A5*. Debido a que se trata de una adaptación a la menor radiación solar, se esperaría que su frecuencia incrementara en las poblaciones situadas a latitudes altas, con una abundancia similar en las poblaciones septentrionales de Asia y de Europa. En lugar de ello, se observa un patrón de barrido en el oeste de Eurasia: la variante génica y el ADN ligado a ella (por autoestop genético) son frecuentes desde Pakistán hasta Francia, pero apenas existen en el este asiático, ni siquiera en las latitudes del norte. Esta distribución indica que la variante ventajosa surgió en las poblaciones ancestrales del oeste eurasiático —poco después de que se separaran de las poblaciones que ocuparían el este asiático— que luego propagaron el alelo a lo largo de su ruta de migración. Por tanto, la selección natural favoreció el nuevo alelo *SLC24A5,* pero la historia de las poblaciones ancestrales ha ayudado a determinar qué poblaciones presentan hoy esta variante y cuáles no. (Existen otros genes responsables de la piel clara en los asiáticos orientales.)

Un examen más detallado de las señales de selección en el caso descrito arriba y otros similares revela un fenómeno curioso. La mayoría de los alelos con frecuencias muy distintas entre poblaciones, como los presentes en casi todos los asiáticos pero ausentes en los africanos, no muestran señales de autoestop, como cabría esperar si la selección natural hubiera hecho aumentar en poco tiempo la frecuencia de esos alelos. Por el contrario, esos alelos parecen haberse propagado de forma gradual durante los últimos 60.000 años, desde que nuestra especie emigrara de Africa.

A la luz de esas observaciones, nos inclinamos a pensar que los barridos selectivos clásicos, en los que la selección natural produce la rápida fijación de una mutación ventajosa, sólo han sucedido unas pocas veces desde que comenzara la diáspora de *H. sapiens* por todo el planeta. Creemos que la selección natural actúa con escasa fuerza sobre los alelos individuales, por lo que su presencia aumenta muy despacio. De este modo, la mayoría de los alelos sólo alcanzarán una frecuencia elevada en la población si la presión de la selección se mantiene durante decenas de miles de años.

Un rasgo, muchos genes

Nuestras conclusiones podrían parecer contradictorias: si un alelo ventajoso ha tardado en extenderse 50.000 años en lugar de 5000, ¿cómo se adaptaron tan deprisa los humanos a las nuevas condiciones? Aunque las adaptaciones más conocidas surgen por cambios en un sólo gen, puede que la mayoría de ellas deriven de variantes génicas que ejercen un efecto leve sobre cientos o miles de genes relevantes en el genoma (efecto poligénico). En una serie de trabajos publicados en 2008 se describieron más de 50 genes que influyen sobre la estatura humana, y aún quedan muchos de ellos por identificar. Cada alelo de esos genes incrementa la estatura promedio sólo entre 3 y 5 milímetros en comparación con el otro alelo.

La selección natural actuó sobre la estatura humana en las poblaciones de pigmeos de la selva tropical de Africa, del sudeste asiático y de Sudamérica, donde una menor talla representaba una adaptación ante la escasez de alimentos en el medio; la selección habría operado ajustando las frecuencias alélicas de cientos de genes. Si la versión "baja" de cada gen de la estatura se vuelve sólo un 10 por ciento más común, entonces la mayoría de las personas de una población adquieren pronto más alelos de "estatura baja" y la población reduce así su talla. Aunque el rasgo en su conjunto experimente una fuerte presión de selección, el efecto de ésta sobre cada gen de la estatura todavía será débil. Debido a que la selección opera con escasa fuerza en los genes individuales, las adaptaciones poligénicas no se detectan como una señal clásica de selección en los estudios genómicos. En resumen, es posible que, en tiempo reciente, el genoma humano haya experimentado más cambios adaptativos de lo que se pensaba, cambios que el examen clásico del genoma no permite identificar.

¿Todavía evolucionamos?

Resulta difícil observar la acción actual de la selección natural en las poblaciones humanas.

El autor

Jonathan K. Pritchard es profesor de genética humana en la Universidad de Chicago e investigador del Instituto Médico Howard Hughes. Investiga la variación genética dentro de poblaciones humanas y entre distintas poblaciones, así como los procesos que provocan esa variación.



Pero uno se puede imaginar sin dificultad algunos rasgos que se verían afectados. Las enfermedades infecciosas como la malaria y el sida están sometidas a una fuerte presión de selección en los países en vías de desarrollo. Se conoce un conjunto de variantes génicas que proveen algún tipo de protección ante esas enfermedades. Sin duda, esas variantes están siendo favorecidas porque los portadores de las mismas probablemente viven más tiempo y tienen más descendientes que los no portadores. En muchas poblaciones del Africa subsahariana existe una variante que se ha extendido en poco tiempo porque protege a sus portadores contra la forma vivax de la malaria. Las variantes que confieren resistencia al VIH, entretanto, podrían expandirse en la población subsahariana en cientos de años si el virus permaneciera inmutable y la variante continuara ofreciendo protección. Pero debido a que el VIH evoluciona más deprisa que los humanos, seguramente se vencerá a la enfermedad con la tecnología, mediante vacunas, antes que por selección natural.

En los países desarrollados, la mortalidad entre el nacimiento y la edad adulta es baja, por lo que la selección tiende a actuar con más fuerza sobre los genes que influyen en el número de descendientes de cada individuo. En 2009, el grupo de Stephen C. Stearns, de la Universidad de Yale, publicó en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* los resultados de un estudio que identificó en las mujeres seis rasgos de heredabilidad intermedia o alta asociados a un mayor número de descendientes. El equipo descubrió que las mujeres con numerosos hijos tendían a ser de menor estatura y mayor peso corporal, y alcanzaban la menopausia más tarde. Por tanto, si el ambiente permaneciera constante durante tiempo, la selección natural podría favorecer esos rasgos: los autores calculan que la media de edad de la menopausia se incrementará en un año en las siguientes diez generaciones, es decir, en los próximos 200 años.

La mayoría de los rasgos evoluciona con extraordinaria lentitud, en comparación con el ritmo en que lo hace la cultura, la tecnología y el medio ambiente. Además, los cambios adaptativos principales requieren condiciones estables durante varios milenios. Aunque sin duda dentro de 5000 años nuestro entorno será muy distinto al actual, en ausencia de ingeniería genómica a gran escala, los humanos se parecerán mucho a los de hoy.

OWEN GILDERSLEEVE

PARA SABER MAS

POSITIVE NATURAL SELECTION IN THE HUMAN LINEAGE. P. C. Sabeti et al. en *Science*, vol. 312, págs. 1614-1620; 16 de junio, 2006.

THE ROLE OF GEOGRAPHY IN HUMAN ADAPTATION. Graham Coop et al. en *PLoS Genetics*, vol. 5, n.º 6, pág. e1000500; 5 de junio, 2009.

SEQUENCING OF 50 HUMAN EXOMES REVEALS ADAPTATION TO HIGH ALTITUDE. Xin Yi et al. en *Science*, vol. 329, págs. 75-78; 2 de julio, 2010.

MEASURING SELECTION IN CONTEMPORARY HUMAN POPULATIONS. Stephen C. Stearns et al. en *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, págs. 611-622; 10 de agosto, 2010.



1. ENSAYO GENERAL: Segmentos del espejo listos para soportar los rigores de una cámara ultrafría (*arriba, derecha e izquierda*).

2. ORFEBRERIA: Los segmentos del espejo, de más de un metro de ancho cada uno, son de berilio, un material muy difícil de pulir (*centro y abajo*).



REPORTAJE

El próximo observatorio espacial

La NASA se encuentra trabajando en el proyecto espacial más ambicioso de las últimas décadas, un telescopio innovador y arriesgado que promete superar los éxitos del Hubble

Robert Irion



l espejo, un hexágono perfecto de color gris broncíneo, se sostiene verticalmente sobre una plataforma de poca altura. Consta de una losa de berilio esculpida con gran precisión, de unos cinco centímetros de grosor y más de un metro de diámetro. Mi guía, el ingeniero jefe Jay Daniel, vigila mis pasos cuando me asomo con cuidado para contemplar mi reflejo. “Es como el espejo del baño”, bromea. La parte trasera, en cambio, no se parece en nada a un espejo doméstico. El bloque se halla casi hueco y convertido en un intrincado andamiaje triangular. Daniel explica que la superficie frontal apenas llega a los 2,5 milímetros de grosor. De los 250 kilos iniciales, el espejo apenas conserva 21; lo bastante ligero como para que un cohete pueda transportar dieciocho piezas al espacio exterior. Una vez allí, se ensamblarán para formar el corazón del telescopio espacial más ambicioso hasta la fecha.

CONCEPTOS BASICOS

- Cuando el Telescopio Espacial Hubble se retire dentro de unos años, una colaboración liderada por la NASA planea sustituirlo por un telescopio de nueva generación.
- Los espejos adaptativos ultraligeros del Telescopio Espacial James Webb se beneficiarán de un área colectora seis veces mayor que la del Hubble. Sus instrumentos observarán en el infrarrojo con una potencia inaccesible para la mayoría de los telescopios.
- Sus objetivos incluyen estudiar la infancia del universo y la formación de las primeras galaxias. También se empleará para la detección de exoplanetas similares a la Tierra.
- La parte más arriesgada de la misión llegará cuando el espejo del telescopio y su inmenso protector solar hayan de desplegarse tras abandonar el cohete que los transportará hasta su órbita. Debido a su enorme distancia, cualquier reparación será imposible.

El observatorio, una misión de cuatro mil millones de euros acometida por la NASA en cooperación con las agencias espaciales europea y canadiense, lleva el nombre de Telescopio Espacial James Webb (JWST, por sus siglas en inglés). Ha sido diseñado para suceder a partir de 2014 al exitoso Telescopio Espacial Hubble. Este último, que desde 1990 orbita a 570 kilómetros sobre la superficie terrestre, ha obtenido las imágenes más nítidas de las galaxias del universo lejano. El Webb también promete ofrecer asombrosas imágenes del cosmos, pero con una mirada mucho más penetrante. Diseñado para volver la vista atrás hacia el comienzo del universo, se espera que observe las explosiones de las primeras estrellas y que revele el origen de las galaxias similares a la Vía Láctea. También dirigirá su atención hacia las nubes de gas y polvo que constituyen los embriones de las estrellas y sus sistemas planetarios.

Para ello, el Webb habrá de ser muy distinto de su predecesor. Una vez ensamblado, su espejo de 6,5 metros de diámetro dispondrá de un área colectora seis veces mayor que la del Hubble, cuyo espejo mide 2,4 metros. Los dieciocho paneles hexagonales bañados en oro actuarán como una única superficie uniforme, una hazaña que requerirá una precisión en el alineamiento del orden de la diezmilésima parte del grosor de un cabello.

Ese panal será puesto en órbita a una distancia muy superior a la que nos separa de la Luna. Por el camino, desplegará un gigantesco parasol para evitar que la temperatura supere los 55 grados Kelvin (unos 220 grados Celsius bajo cero). Ello permitirá al telescopio captar las trazas de luz y calor que han vagado por el universo durante más de 13.000 millones de años.

Todo lo anterior implica una serie de riesgos técnicos sin precedentes. Debido a su lejano emplazamiento, ningún astronauta podrá ir a repararlo si algo sale mal. A diferencia del Hubble, que ha requerido varios arreglos y mejoras durante las dos décadas que lleva en activo, en este caso no habrá vuelos en trasbordador espacial para corregir un lamentable defecto óptico ni artilugios para desatascar la pantalla protectora.

Además, para su transporte será necesario embutir la sonda en el estrecho compartimento de carga de un cohete Ariane 5. Un viaje así impone severas limitaciones al peso y las dimensiones del telescopio. Una vez en destino, el observatorio habrá de desplegarse con la precisión de un bailarín en una tortuosa secuencia que finalizará cuando dos paneles de espejos se abran y se coloquen en su sitio, como si fueran las alas de una mesa abatible.

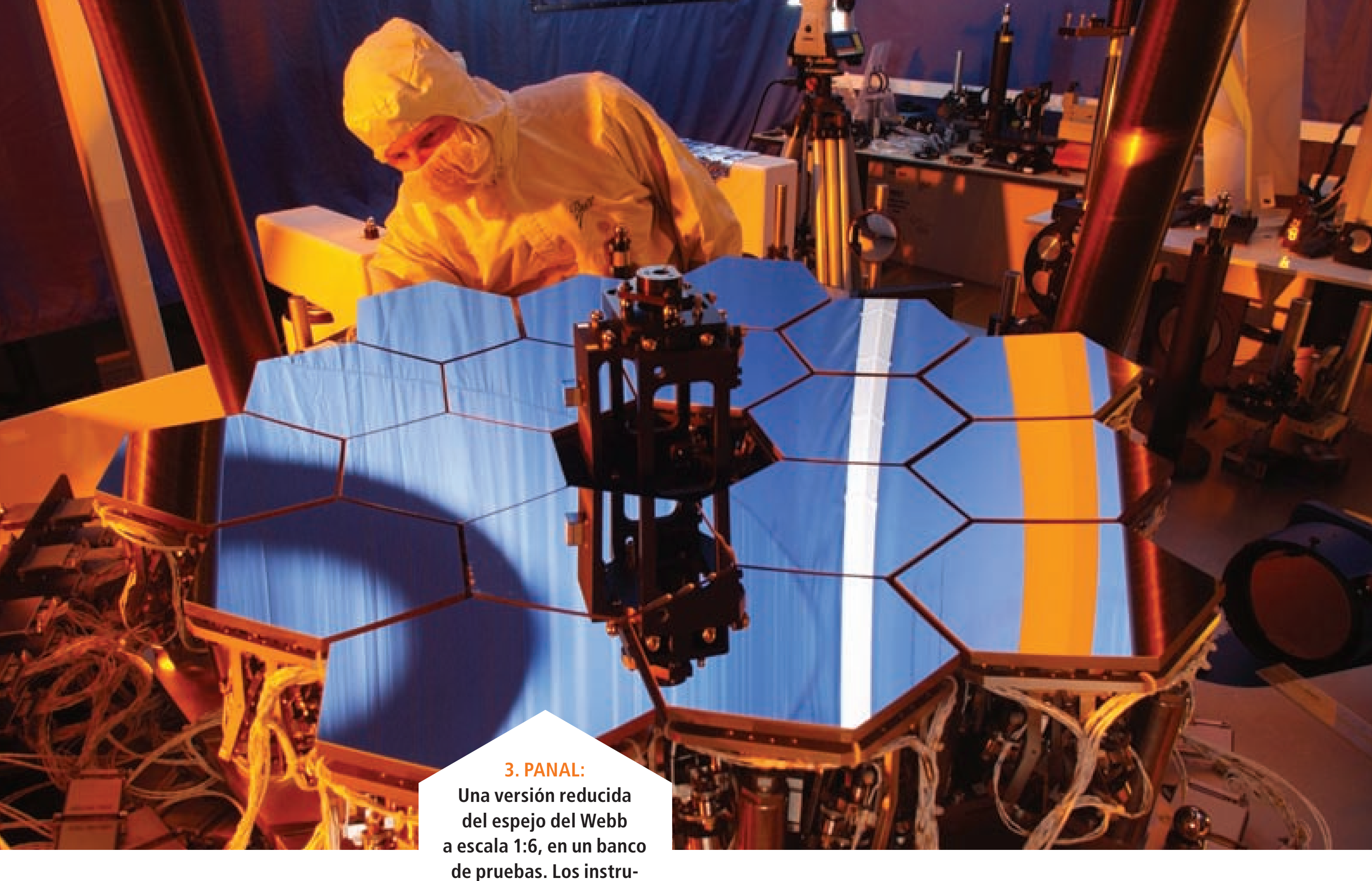
“Me lo imagino como un telescopio de papiroflexia”, explica Mark Clampin, científico del proyecto en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA, en Greenbelt. “Tenemos que desempaquetarlo, alinearlo y hacerlo funcionar a la temperatura correcta. No será posible repararlo, así que todo habrá de funcionar desde el primer día.”

La combinación de restricciones de peso, tamaño y temperatura, así como las proezas técnicas para llevarlas a cabo, han obligado a la NASA a gastarse bastante más de lo que a muchos les hubiera gustado. Un comité nacional calificó el JWST como prioridad astronómica en 2001, con un presupuesto inicial de mil millones de euros. Pero la cifra pecó de ingenua al no incluir los costes de lanzamiento y operación del telescopio. Además, se subestimaron en enorme medida la complejidad del diseño y el tiempo necesario. “Los retos [de ingeniería] resultaron mucho mayores de lo que se había previsto”, explica Eric P. Smith, de la NASA.

El coste del proyecto no se aleja del de otros satélites pioneros, apunta Smith. Por ejemplo, cuando completen sus operaciones, el Observatorio de Rayos X Chandra (ahora en órbita) o la sonda Cassini (que explora Saturno, sus lunas y anillos) habrán costado, cada uno, unos tres mil millones de euros del año 2007. “Es lo que cuesta poner en marcha una misión de bandera”, apunta Alan Dressler, del Observatorio Carnegie, en Pasadena, quien en 1995 coordinó el primer informe sobre el sucesor del Hubble.

Otros opinan que el observatorio consume una parte desproporcionada del presupuesto de la NASA, en detrimento de otras misiones. “El coste de oportunidad del JWST es muy elevado y se dejará sentir durante toda una década”, sostiene

PAGINAS ANTERIORES: JUSTIN FANTL; CORTESIA DE NASA/MSFC/EMMETT GIVENS (*arriba derecha y abajo izquierda*)



3. PANAL: **Una versión reducida del espejo del Webb a escala 1:6, en un banco de pruebas. Los instrumentos se disponen en el centro de 18 segmentos de berilio.**

CORTESIA DE BALL AEROSPACE & TECHNOLOGIES CORP.

el astrofísico Shrinivas Kulkarni, del Instituto de Tecnología de California. En particular, añade, los instrumentos avanzados para detectar ondas gravitacionales, explorar el universo de altas energías o localizar posibles planetas similares a la Tierra habrán de esperar al decenio de 2020, si no más. Además, en el momento de enviar este artículo a imprenta se hacía público un informe de la NASA que refería un sobrecoste imprevisto de unos mil millones de euros. Las primeras reacciones estimaban que ello podría suponer un retraso en el lanzamiento de entre uno y tres años.

También los partidarios del Webb quisieran contar con la completa certeza de que la inversión merecerá la pena. "Se trata de un proyecto muy ambicioso", explica Gary Illingworth, de la Universidad de California en Santa Cruz y usuario veterano del Hubble. "Es un proyecto difícil, incluso para los estándares de la NASA. Y si al final el JWST no se despliega, a casi todos los efectos habrá muerto."

Territorio por explorar

El Webb se lanzará hacia un punto de equilibrio gravitatorio denotado L_2, a más de un millón de kilómetros de distancia de la Tierra. (La Luna se halla a unos 390.000 kilómetros, y Marte, en su punto más próximo, dista más de 50 millones de kilómetros.) Una vez allí, la nave utilizará pequeñas dosis de combustible para ajustar su movimiento al de la Tierra e instalarse en una órbita estable alrededor de L_2. Los ingenieros creen que el combustible bastará para una década. El presupuesto de la NASA cubre cinco años de operaciones; extenderlo cinco años más costaría unos 400 millones de euros.

Hace 15 años, cuando la misión comenzó a planearse, ya se sabía que habría que enviar muy lejos el satélite. El Hubble orbita tan próximo a la superficie terrestre que el resplandor del planeta lo hace "ciego" a la débil luz infrarroja de los objetos más distantes. Con el Webb, los astrónomos esperan detectar las primeras galaxias que se formaron, diseminadas por los confines del universo observable. Por aquel entonces, la luz de esas galaxias hubiera sido visible para nuestros ojos (o para las cámaras del Hubble). Pero, durante los miles de millones de años que esa luz ha estado viajando hacia nosotros, la expansión cósmica ha dilatado su longitud de onda, que ha pasado del visible al infrarrojo.

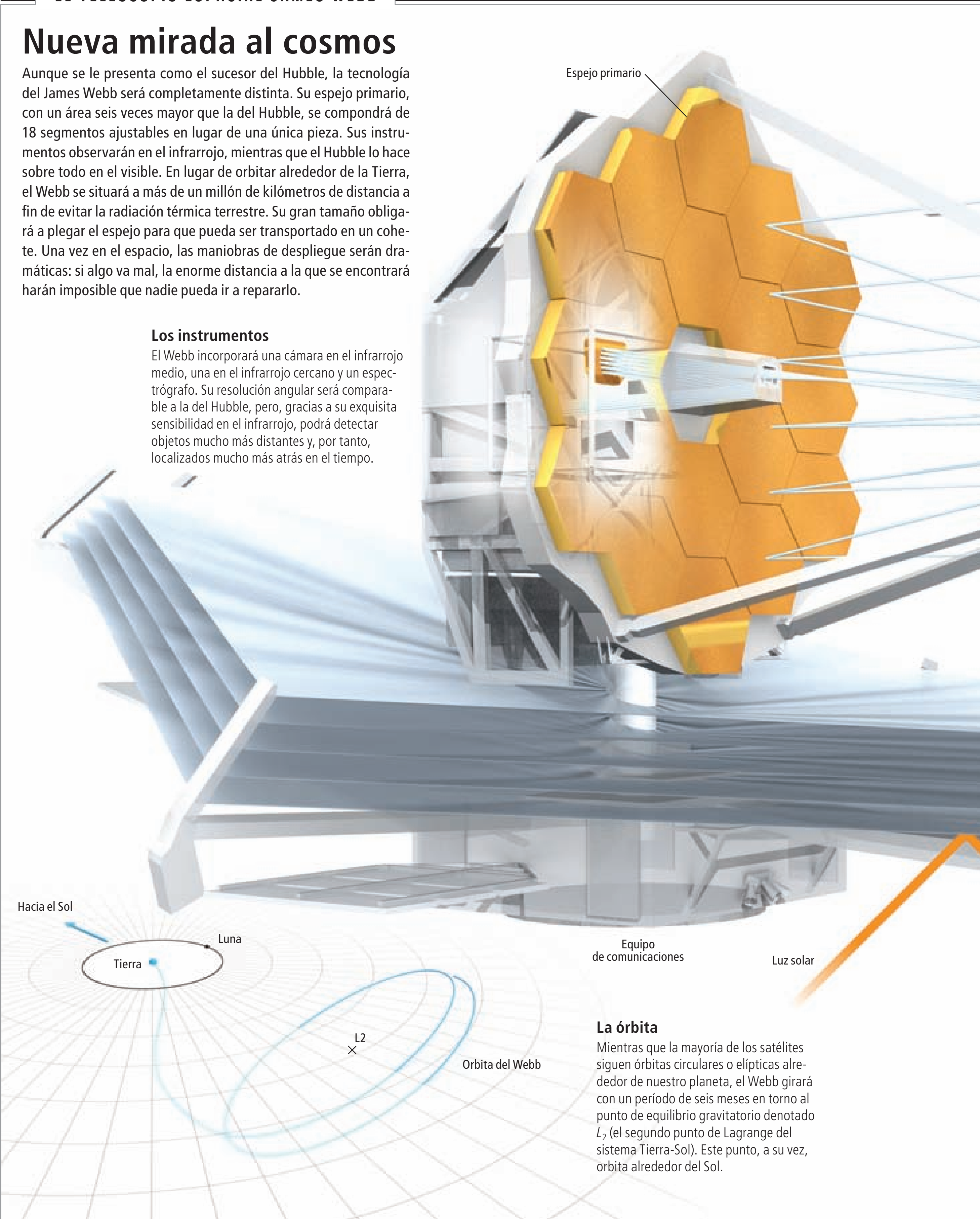
"Aquí reside la nueva oportunidad", señala el científico jefe del proyecto y premio Nobel John C. Mather, del centro Goddard de la NASA. "Este es el naipe que nos queda por dar la vuelta; el lugar donde nunca hemos mirado. No sabemos cuáles fueron los primeros objetos que se iluminaron tras la gran explosión."

Bautizado en honor al administrador de la NASA durante la era Apolo, el Telescopio Espacial James Webb utilizará cámaras infrarrojas y otros instrumentos para observar la formación de las primeras galaxias y el momento en que se ensamblaban para dar lugar a los majestuosos sistemas que observamos hoy. Esos objetos embrionarios existieron unos 400 millones de años después de la gran explosión, cuando la edad del universo apenas alcanzaba un tres por ciento de la actual. El JWST quizá detecte el brillo de estrellas aún más antiguas, gigantes cientos de veces más masivos que nuestro Sol. Tales estrellas detonaron tras una vida corta, y la luz que emitieron entonces aún se propaga a través del cosmos.

"Estamos realizando un esfuerzo extraordinario para construir un telescopio mucho más ambicioso que el Hubble, para observar tan lejos como jamás podremos hacerlo", afirma Dressler. "La

Nueva mirada al cosmos

Aunque se le presenta como el sucesor del Hubble, la tecnología del James Webb será completamente distinta. Su espejo primario, con un área seis veces mayor que la del Hubble, se compondrá de 18 segmentos ajustables en lugar de una única pieza. Sus instrumentos observarán en el infrarrojo, mientras que el Hubble lo hace sobre todo en el visible. En lugar de orbitar alrededor de la Tierra, el Webb se situará a más de un millón de kilómetros de distancia a fin de evitar la radiación térmica terrestre. Su gran tamaño obligará a plegar el espejo para que pueda ser transportado en un cohete. Una vez en el espacio, las maniobras de despliegue serán dramáticas: si algo va mal, la enorme distancia a la que se encontrará harán imposible que nadie pueda ir a repararlo.

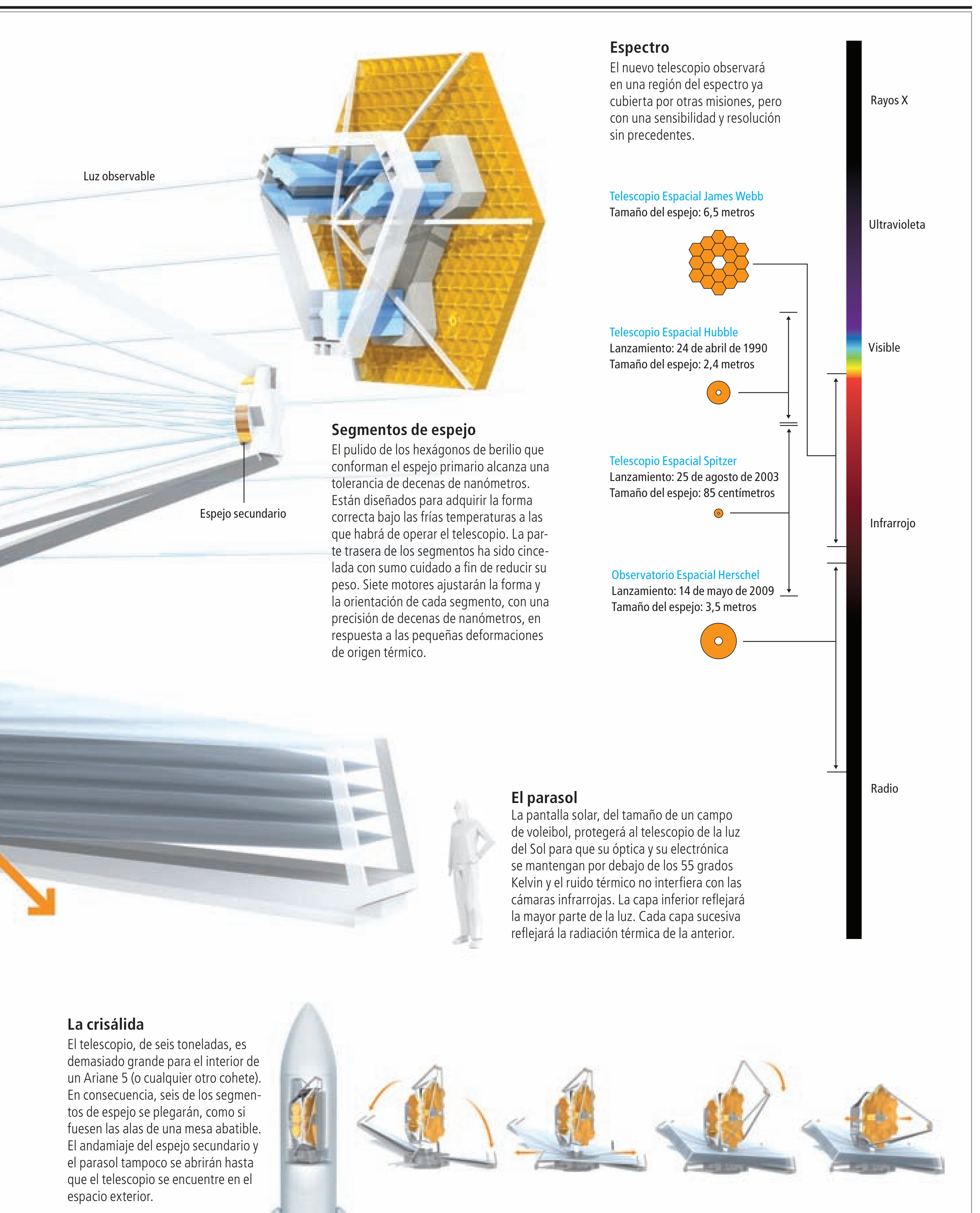


Los instrumentos

El Webb incorporará una cámara en el infrarrojo medio, una en el infrarrojo cercano y un espectrógrafo. Su resolución angular será comparable a la del Hubble, pero, gracias a su exquisita sensibilidad en el infrarrojo, podrá detectar objetos mucho más distantes y, por tanto, localizados mucho más atrás en el tiempo.

La órbita

Mientras que la mayoría de los satélites siguen órbitas circulares o elípticas alrededor de nuestro planeta, el Webb girará con un período de seis meses en torno al punto de equilibrio gravitatorio denotado L_2 (el segundo punto de Lagrange del sistema Tierra-Sol). Este punto, a su vez, orbita alrededor del Sol.



Espectro

El nuevo telescopio observará en una región del espectro ya cubierta por otras misiones, pero con una sensibilidad y resolución sin precedentes.

Segmentos de espejo

El pulido de los hexágonos de berilio que conforman el espejo primario alcanza una tolerancia de decenas de nanómetros. Están diseñados para adquirir la forma correcta bajo las frías temperaturas a las que habrá de operar el telescopio. La parte trasera de los segmentos ha sido cincelada con sumo cuidado a fin de reducir su peso. Siete motores ajustarán la forma y la orientación de cada segmento, con una precisión de decenas de nanómetros, en respuesta a las pequeñas deformaciones de origen térmico.

El parasol

La pantalla solar, del tamaño de un campo de voleibol, protegerá al telescopio de la luz del Sol para que su óptica y su electrónica se mantengan por debajo de los 55 grados Kelvin y el ruido térmico no interfiera con las cámaras infrarrojas. La capa inferior reflejará la mayor parte de la luz. Cada capa sucesiva reflejará la radiación térmica de la anterior.

La crisálida

El telescopio, de seis toneladas, es demasiado grande para el interior de un Ariane 5 (o cualquier otro cohete). En consecuencia, seis de los segmentos de espejo se plegarán, como si fuesen las alas de una mesa abatible. El andamiaje del espejo secundario y el parasol tampoco se abrirán hasta que el telescopio se encuentre en el espacio exterior.

BRYAN CHRISTIE

Qué verá el nuevo observatorio

El Telescopio Espacial James Webb ha sido diseñado para remontarse mucho más allá en la historia del cosmos que el actual buque insignia de la NASA, el Telescopio Espacial Hubble. Además, sus sensores infrarrojos le permitirán estudiar con gran detalle las regiones de gestación estelar en nuestra galaxia, así como los objetos más débiles de nuestro sistema solar. La misión, de cinco años de duración, atacará cuatro cuestiones principales:

- ¿Cómo acabó la edad oscura del cosmos? El Webb debería detectar los primeros objetos brillantes que aparecieron en el universo unos 180 millones de años después de la gran explosión: las primeras generaciones de estrellas gigantes y sus explosiones de supernova.
- ¿Cómo se forman las galaxias como la Vía Láctea? Las imágenes del Webb rastrearán el nacimiento de galaxias en el interior de sus envoltorios de materia oscura que, junto con los agujeros negros de sus núcleos, guiaron su formación.
- ¿Cómo nacen las estrellas y los planetas? Nuestro Sol nació en una fría nube de gas y polvo. La Tierra y los demás planetas se formaron a partir del disco de gas y polvo que se arremolinaba alrededor de la estrella. Los sensores infrarrojos del Webb penetrarán en esas nubes de polvo y revelarán tales procesos con sumo detalle.
- ¿Hay vida en otros lugares? El Webb estudiará familias de planetas en estrellas cercanas, así como los cometas y los asteroides primitivos en órbita alrededor del Sol, a fin de averiguar los procesos que permitieron la aparición de vida en nuestro planeta.

NASA aspiraba a construir el primero de los nuevos telescopios, no el último de los viejos.”

La observación en el infrarrojo también abre una ventana a objetos más cercanos. En particular, permite atisbar a través del velo de polvo que esconde los criaderos de estrellas y planetas en nuestra galaxia. Actualmente se detectan planetas extrasolares mediante observaciones en el espectro visible, por lo que sólo se muestran aquellos sistemas que han “limpiado” su entorno de los discos de gas y desechos rocosos a partir de los cuales se formaron. Pero, dado que la luz infrarroja atraviesa el polvo, el Webb revelará numerosas fases de la gestación de sistemas planetarios. Con ello, ayudará a determinar si nuestro sistema solar es una rareza o algo común. Además, algunos de los planetas pasarán por delante de su estrella anfitriona, una ocasión que brindará al Webb la oportunidad de detectar los gases de sus atmósferas. El descubrimiento de un planeta con una mezcla inestable de oxígeno, dióxido de carbono y metano constituiría el primer indicio de posible vida extraterrestre.

Espejos de berilio

Otros telescopios espaciales ya han utilizado pequeños espejos de berilio, el segundo metal más ligero. Y el espejo primario del Webb, de 6,5 metros de diámetro, no es exagerado para los estándares astronómicos: varios telescopios terrestres cuentan con espejos de 8 o 10 metros, y hay proyectados instrumentos aún mayores. Pero fabricar 18 segmentos de berilio para que se ensamblen en una única superficie uniforme en el espacio exterior ha impuesto unas exigencias técnicas sin precedentes.

Ese reto ha sido afrontado por Tinsley, una empresa de óptica de Richmond, en California, propiedad de L-3 Communications. Antes de nuestra visita (se trata de la primera vez que Tinsley autoriza a un periodista a ver su trabajo con los espejos), Daniel me solicita no llevar la cámara y me advierte de la existencia de preguntas prohibidas. La fabricación de espejos para telescopios es extremadamente competitiva; se han invertido años y millones de euros en perfeccionar el diseño del Webb.

Al llegar me informan sobre la toxicidad del polvo de berilio. Debo firmar un documento que exculpa a Tinsley en caso de enfermedad pulmonar. Daniel me asegura que el laboratorio sólo pule sus espejos mediante procesos húmedos, por lo que no hay polvo flotando en el ambiente. Mis pulmones pueden estar tranquilos, si bien en ocasiones he de portar una mascarilla para que ningún estornudo salpique el metal.

En los comienzos del proyecto se pensó en espejos de cristal de expansión ultrabaja, el cual conserva la forma bajo cambios de temperatura. Sin embargo, al someter los prototipos a las gélidas temperaturas que el telescopio habrá de soportar en el espacio, el cristal se deformó de una manera tal que hubiera desestabilizado el telescopio. El berilio, en cambio, es robusto y soporta bien esas temperaturas.

Ese cambio de planes supuso un retraso de un año, ya que pulir el berilio requiere más tiempo. “Es tremendamente difícil fabricar un espejo de berilio sin que queden tensiones”, comenta el ingeniero óptico Bob Brown, de Ball Aerospace & Technologies, en Boulder, quien supervisa la labor de Tinsley. Explica que, al tallar la superficie, el resto del material tiende a doblarse hacia arriba. Esa capa sometida a tensiones debe ser eliminada con ácido o utensilios afilados, un proceso muy lento que exige suma minuciosidad.

Para contemplar los espejos he de vestir bata y botines, a fin de proteger mi ropa y zapatos de restos de berilio. Daniel y Brown me conducen a la planta de fabricación, levantada ex profeso para la construcción del Webb. Ocho máquinas de pulido, cada una de dos pisos de altura, dominan la habitación. Uno de los segmentos del espejo se encuentra sobre una máquina, controlada por ordenador. Un fuelle negro con forma de acordeón desplaza con lentitud un robot sobre la superficie. El extremo del robot se halla fijado a una cabeza pulidora del tamaño de un *frisbee*, y el ordenador controla cuánto tiempo debe rotar en cada punto para eliminar la cantidad exacta de berilio.

Un líquido blanquecino lubrica la cabeza y se escurre por el espejo con un flujo constante. Daniel sonríe cuando le pregunto de qué se trata. “Es un líquido de pulido”, dice tras una pausa. “Receta de la casa. Tiene unas características muy específicas y es privado”. Brown señala los bordes del hexágono. La superficie pulida llega hasta cinco milímetros del borde, una proeza que nunca se había intentado en un espejo tan grande. Si el margen fuera el doble, el telescopio enfocaría un 1,5 por ciento menos de

El autor

Robert Irion, antiguo corresponsal de la revista *Science*, dirige el programa de comunicación científica de la Universidad de California en Santa Cruz. Escribe sobre astronomía para *Smithsonian* y otras publicaciones.

luz; una gran pérdida de datos en el caso los astros más débiles.

La precisión de la superficie de los espejos se mide en el laboratorio de metrología de Tinsley, un espacio cerrado con estrictos controles de temperatura y de las corrientes de aire. Allí, hologramas, láseres infrarrojos y otras herramientas calibran la altura de cientos de miles de puntos sobre la superficie del espejo. Cada segmento va y viene de las máquinas de pulido al laboratorio de metrología más de veinte veces hasta que alcanza la forma y la suavidad requeridos.

A continuación, los segmentos se envían a Ball Aerospace. Allí se unen a su soporte de vuelo, una estructura de cierto compuesto de grafito que se encaja a la malla hexagonal de la parte trasera y los mantiene en su sitio dentro del telescopio. De allí se trasladan al Centro de Vuelo Espacial de la NASA en Huntsville, Alabama, donde se someten a prueba en una gran cámara de vacío refrigerada con helio líquido a 25 grados Kelvin. El frío induce pequeñas deformaciones en el metal; las mismas se cartografían con precisión microscópica y, después, los segmentos regresan a California. Allí se procede a un pulido adicional para cancelar las deformaciones que sufrirá el berilio una vez inmerso en el frío del espacio.

Ese lento proceso comenzó en diciembre de 2009. En agosto de este año, un segmento del espejo ya se había completado y unos seis se hallaban en las últimas fases de pulido. Se estima que los 18 segmentos —y tres repuestos— estarán listos a mediados de 2011.

Aprendiendo del Hubble

El triste defecto que en su día sufrió el Telescopio Espacial Hubble no abandona la mente de los ingenieros. Como consecuencia de un error de medida que pasó desapercibido, el espejo del Hubble se pulió de manera incorrecta. Tres años después del lanzamiento, los astronautas del trasbordador espacial tuvieron que instalar espejos correctores para salvar la misión. En el caso del James Webb, una opción así no existirá.

Escarmentados, los expertos de la NASA han reclutado a los ingenieros que repararon el Hubble. La misma técnica que permitió diagnosticar las deformaciones del espejo mediante el estudio de las imágenes borrosas mantendrá al Webb enfocado. “A medida que el telescopio surca el espacio, aparecen gradientes de temperatura que deforman poco a poco el espejo”, explica Matt Mountain, director del Instituto Científico del Telescopio Espacial en Baltimore, que supervisará la operación. A diferencia de cualquier otro observatorio espacial, el Webb contará con un espejo ajustable para compensar esas alteraciones.

Un conjunto de pequeñas lentes emplazadas en el telescopio generará imágenes desenfocadas, como las que afectaron al Hubble. Tras analizarlas, el control de la misión enviará señales de radio para activar siete pequeños motores en la parte trasera de cada segmento. Cada motor, construido por Ball Aerospace, puede desplazar el espejo con una precisión de 10 nanómetros. Eso permitirá ajustar la curvatura de cada segmento y su posición con respecto a los hexágonos adyacentes. El control de la misión recalibrará el espejo cada dos semanas.

Por supuesto, todo ello requiere que el telescopio se despliegue como es debido. En concreto, los dos paneles que viajan plegados, cada uno con tres hexágonos, deberán extenderse de la manera correcta para completar la superficie del espejo. Después también habrá de colocarse en posición un espejo secundario, de 75 centímetros de diámetro. Se apoyará en un trípode a siete metros de distancia del espejo principal. Su función será colectar la luz del espejo principal y volver a reflejarla hacia el centro de éste. Allí, a través de un orificio, llegará a los instrumentos de medida.

Pero lo que de verdad hace tragar saliva a los ingenieros es la apertura del gigantesco parasol, de 11 metros de ancho por 19 de largo. Si no funciona, la luz del Sol cegará los instrumentos del Webb, los sobrecalentará y el telescopio quedará inútil. En un vídeo simulado se ve cómo se abre la pantalla; cinco “envoltorios”, cada uno del tamaño de un campo de voleibol, se disponen uno sobre otro. El principal contratista de la NASA, Northrop Grumman, de Redondo Beach, California, ha diseñado satélites con enormes antenas desplegables y, según fuentes de la NASA, también algunas operaciones espaciales encubiertas para el gobierno de los EE.UU. Pero el Webb será la misión civil más compleja que jamás se haya intentado.



4. ESQUELETO: **Gracias a su estructura de compuestos de grafito, titanio y una aleación de níquel y acero, el Webb no se combará más de 32 nanómetros.**

CORTESIA DE NASA

A la ansiedad del equipo contribuye el hecho de que no existen cámaras frías de vacío lo bastante grandes como para someter a ensayos el parasol completo.

Por motivos presupuestarios, la NASA ha adoptado un procedimiento más arriesgado, consistente en probar piezas clave del observatorio, pero nunca el equipo completo. “Esto es vivir peligrosamente”, dice Mountain. “Vamos a necesitar un acto de fe”.

Por ahora, los científicos de la misión se centran en construir el telescopio y sus instrumentos, pero no pueden evitar mirar más allá del lanzamiento, en 2014. “En cierta medida, es el legado que nuestra generación dejará a la civilización”, comenta Lee Feinberg, administrador de elementos ópticos del Webb. “No durará para siempre, pero estará ahí, en el espacio, y las generaciones futuras probablemente podrán localizarlo con grandes telescopios”. Y tal vez algún día, su espejo dorado, castigado por el polvo espacial y la radiación, sea traído de vuelta a la Tierra, a modo de reliquia de la época en la que comenzamos a entender nuestro pasado cósmico.

PARA SABER MAS

ESTRELLAS PRIMIGENIAS. Richard B. Larson y Volker Bromm en *Investigación y Ciencia*, vol. 305, págs. 50-57; febrero de 2002.

EL ORIGEN DEL UNIVERSO. Michael S. Turner en *Investigación y Ciencia*, vol. 398, págs. 18-25; noviembre de 2009.

EXOPLANETAS HABITABLES. Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia en *Investigación y Ciencia*, vol. 409, págs. 16-23; octubre de 2010.

REVOLUCION APLAZADA

El Proyecto Genoma Humano no ha producido hasta el momento los grandes avances médicos que prometió. Se debate ahora sobre los posibles errores cometidos y las estrategias futuras a emprender

Stephen S. Hall

CONCEPTOS BASICOS

- El año 2000 se pronosticó que las investigaciones derivadas del Proyecto Genoma Humano sentarían las bases para una medicina personalizada en el breve plazo de diez años. Sin embargo, hasta la fecha, el trabajo ha generado pocas aplicaciones médicas.
- Destacados genéticos sostienen que la principal estrategia utilizada para ahondar en el conocimiento de enfermedades complejas frecuentes (la hipótesis de las "variantes frecuentes") es básicamente incorrecta. Otros defienden su validez y afirman que hace falta más tiempo para que dé los frutos.
- Los métodos de última generación para el estudio del genoma debería pronto ayudarnos a resolver esta controversia y avanzar en la investigación de las causas genéticas de las principales enfermedades.

Hace un decenio, la comunidad científica desbordaba optimismo ante las promesas médicas que ofrecía el Proyecto Genoma Humano, dotado con 3000 millones de dólares. Al anunciar el primer borrador del genoma humano en una ceremonia celebrada en la Casa Blanca en verano de 2000, el presidente Bill Clinton predijo que el proyecto "revolucionaría el diagnóstico, la prevención y el tratamiento de la mayoría de las enfermedades humanas".

Un año antes, Francis S. Collins, a la sazón director del Instituto Nacional para la Investigación del Genoma Humano y quizás el defensor más entusiasta e incombustible del proyecto, previó hacia 2010 una situación excelente para la "medicina personalizada" gracias a los resultados que iban a obtenerse. Para ese año se dispondría de pruebas genéticas que indicarían el riesgo de cardiopatía, cáncer o cualquier otra enfermedad común, a las que pronto seguirían medidas preventivas y tratamientos adaptados a cada individuo.

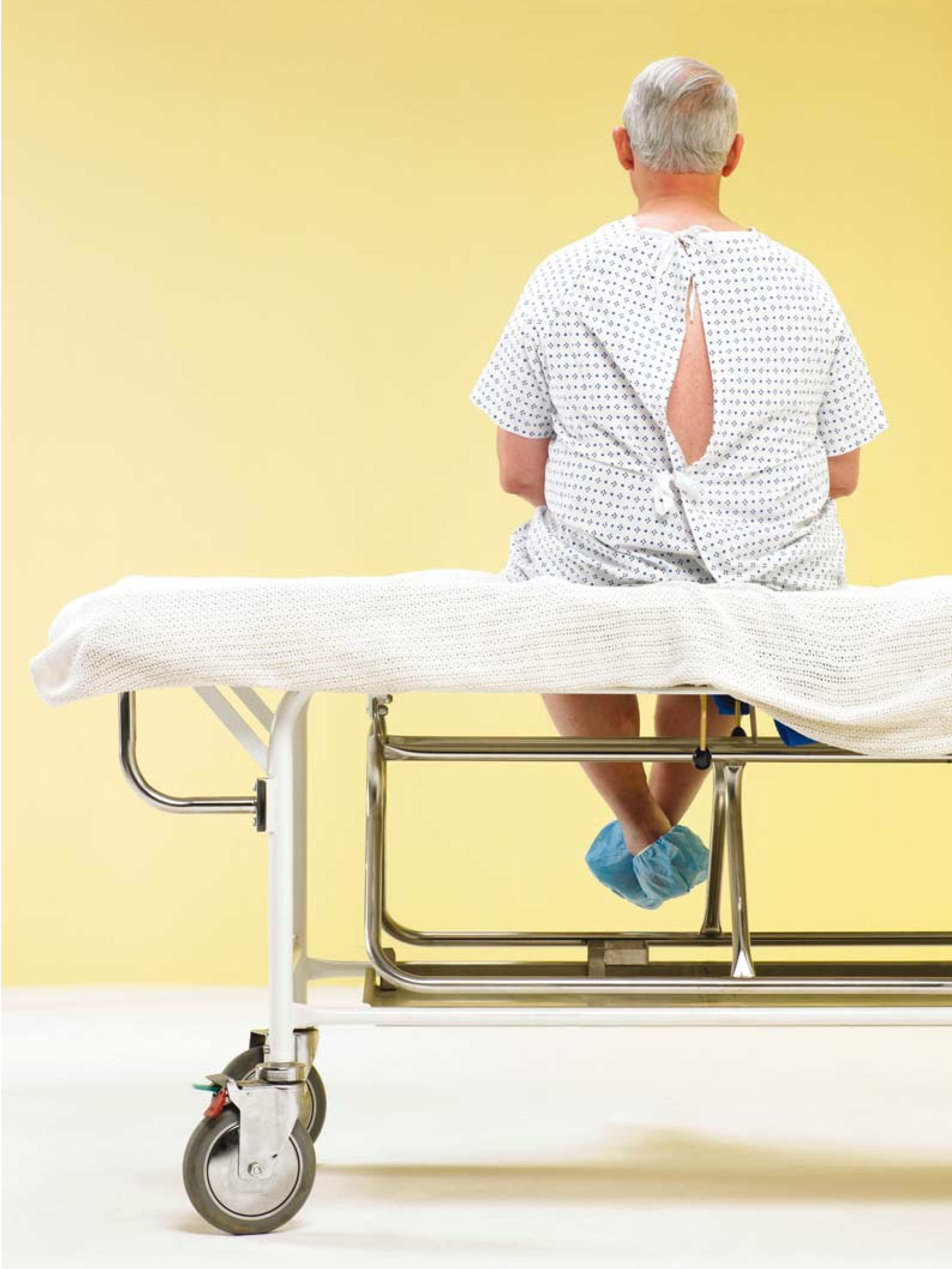
Incluso antes de que se hubiese descifrado la primera secuencia completa del ADN de los cromosomas humanos, ya se había puesto en marcha toda una maquinaria genómica bien financiada —dotada de potentes técnicas para secuenciar y cartografiar genes, enormes bases de datos y un conjunto de algoritmos— para identificar los genes clave responsables de las grandes enfermedades de la humanidad.

Se ha alcanzado el plazo de 2010 y la comunidad científica se halla desanimada y dividida. La causa de ello no radica en el propio proyecto genómico, que ha revolucionado el ritmo y el ámbito de la investigación básica, ha revelado la finalidad del ADN no codificante ("ADN basura") e incluso ha descubierto vestigios de ADN neandertal en nuestros genomas. El investigador del cáncer Bert Vogelstein, haciéndose eco de un sentimiento muy extendido, afirma: "El Proyecto Genoma Humano ha cambiado radicalmente la forma en que hacemos ciencia".

El problema es que, hasta la fecha, los estudios derivados del proyecto genómico no han logrado los avances médicos que Collins y otros auguraron hace un decenio. El biólogo especializado en tumores Robert A. Weinberg, del Instituto Whitehead de Investigación Biomédica de Cambridge, Massachusetts, afirma que los beneficios obtenidos de la genómica del cáncer "han sido modestos; *muy* modestos, en comparación con los recursos invertidos". Harold E. Varmus, antiguo director del Instituto Nacional de la Salud (NIH), escribió hace poco en el *New England Journal of Medicine* que sólo unas pocas innovaciones importantes han pasado a formar parte de la práctica médica habitual, la mayoría de ellas resultado de descubrimientos anteriores a la secuenciación del genoma humano. David B. Goldstein, director del Centro para el estudio de las variaciones en el genoma humano de la Universidad Duke, afirma: "Debemos admitir que el próximo año no vamos a estar en condiciones de personalizar el tratamiento de las enfermedades frecuentes".

Quizás era excesivo esperar milagros en tan sólo diez años (a pesar de las predicciones

SIRI STAFFORD *Getty Images*



Destacados expertos en genómica insisten en la eficacia de la estrategia de las “variantes frecuentes” para averiguar las causas de enfermedades frecuentes



ERIC S. LANDER, del Instituto Broad en el M.I.T., considera asombrosos los progresos recientes.

de los promotores del proyecto genómico). Sin embargo, detrás de la decepción reinante subyace hoy en día otra cuestión más inquietante todavía: ¿Se debe el modesto impacto médico de las investigaciones a la ineficacia de la estrategia empleada para identificar las causas genéticas de las enfermedades frecuentes? La estrategia consiste esencialmente en buscar ligeras variaciones en la secuencia de ADN de los genes que podrían incrementar en conjunto el riesgo de un individuo de contraer una enfermedad común. Durante años, se ha abrazado la hipótesis de que ciertas variantes frecuentes tendrían una mayor presencia en las personas con una determinada enfermedad, por lo que si se descubrían esas variantes se llegaría a comprender cómo se heredaba la predisposición a enfermedades importantes y biológicamente complejas, como la diabetes de tipo 2 o la aterosclerosis. El descubrimiento fallido de variaciones genéticas que afecten a la enfermedad, ¿se debe entonces a la falsedad de la hipótesis de las “variantes frecuentes”?

Esa cuestión ha abierto una fisura en la comunidad científica. Por un lado, destacados expertos en genómica insisten en la eficacia de la estrategia de las variantes frecuentes. Eric S. Lander, director del Instituto Broad, filial del Instituto Whitehead, afirma: “durante los últimos tres años, los resultados de las investigaciones que han identificado las claves genéticas de la enfermedad han sido asombrosos” y “apenas hemos empezado a arañar la superficie de las variantes frecuentes”. Opina que la revolución médica llegará a medida que mejoren las técnicas; a tiempo para que, si no lo vemos nosotros, lo vean nuestros hijos. En otras palabras, la revolución tan sólo se está retrasando.

Por otro lado, un grupo cada vez mayor de biólogos sostiene que la estrategia de las variantes frecuentes es ineficaz. En un ensayo publicado el pasado mes de abril en la revista *Cell*, que despertó un acalorado debate, los genéticos Mary-Claire King y Jon M. McClellan, de la Universidad de Washington, razonaban que no se ha demostrado que la mayoría de las variantes frecuentes tengan una relevancia biológica para la enfermedad ni una utilidad clínica para el pronóstico o el tratamiento. El genético Walter Bodmer, antiguo responsable de ciencia en el gobierno británico, afirma con rotundidad que la estrategia de buscar variantes frecuentes es “científicamente incorrecta”.

Mientras algunos expertos en genómica celebran los progresos realizados hasta la fecha, otros contemplan los mismos resultados con insatisfacción y se preguntan: ¿y llegados a este punto, hacia dónde vamos? Responder a esa pregunta para llegar a conocer en profundidad las enfermedades humanas y su mecanismo de herencia puede llevar a la investigación médica por derroteros totalmente nuevos.

Decepción

La hipótesis de las variantes frecuentes parecía una apuesta razonable cuando se planteó por primera vez en los años noventa. Según la misma, muchas enfermedades familiares humanas se explicarían por la herencia de un número pequeño de variantes génicas frecuentes. Tradicionalmente, los genes se han definido como segmentos de ADN que codifican proteínas. Las variantes corresponderían a secuencias ligeramente diferentes, mutadas, de un mismo gen. Como consecuencia, se produce una alteración en la región del ADN que codifica la proteína o bien en el ADN colindante que regula la velocidad y el momento de la “expresión” génica (la síntesis de proteínas). Las proteínas desempeñan múltiples tareas en las células, por lo que su mal funcionamiento o baja concentración pueden interrumpir rutas moleculares o cadenas de interacciones importantes para la salud.

La creencia de que las variantes frecuentes ayudarían a comprender las enfermedades poseía cierta lógica evolutiva. Según Lander, la rápida y reciente explosión de la población humana ancestral, hace decenas de miles de años, “fijó” numerosas variantes en el acervo génico de nuestra especie. Se supuso que las variantes frecuentes (las que se presentan en al menos el cinco por ciento de una población) no costarían de identificar y que un pequeño número de ellas (desde unas cuantas hasta, quizás, algunas docenas) determinarían nuestra predisposición a sufrir hipertensión, demencias y otras enfermedades extendidas. Las variantes génicas relacionadas con enfermedades y las proteínas codificadas por ellas, así como las rutas en las que desempeñan un papel crucial, podrían convertirse entonces en posibles objetivos terapéuticos.

Sin embargo, esa estrategia se acogió desde un principio con cierta disensión. En 1993, Kenneth M. Weiss, biólogo evolutivo de la Universidad estatal de Pensilvania, parafraseó una cita célebre de León Tolstói, que aparece en su novela *Ana Karenina*, para resaltar algunos aspectos de la genética de las enfermedades complejas: “Todas las familias sanas se parecen entre sí; cada familia enferma tiene su propia forma de mantenerse enferma”. Tal y como Weiss y Joseph D. Terwilliger, genético y estadístico de la Universidad de Columbia, no se cansaban de repetir, las variantes frecuentes probablemente ejerzan un escaso efecto: si causaran un daño importante, la selección natural hubiese evitado que se propagaran en

RICK FRIEDMAN *Corbis*

Bases del estudio del genoma

Gran parte de las investigaciones sobre los factores genéticos de las enfermedades frecuentes han partido de la suposición de que ciertas variantes del ADN que aparecen con frecuencia en la población humana serían las causantes del trastorno. Sin embargo, algunos rechazan este razonamiento.

El punto de partida

El Proyecto Genoma Humano identificó la secuencia de los pares de nucleótidos (los elementos con los que se construye el ADN) del genoma humano a partir del estudio del ADN de varios voluntarios. Cada par está formado por un nucleótido (que contiene la base nitrogenada A, C, T o G) en una de las hebras de la doble hélice de ADN y su complementario en la hebra opuesta (C siempre se empareja con G y A con T). Varios trabajos han revelado numerosos polimorfismos de un único nucleótido, o SNP —regiones del cromosoma en las que un par de nucleótidos difiere de una persona a otra (*abajo*)— y han permitido identificar SNP frecuentes, es decir, los que varían en muchas personas.

Hélice de ADN
Núcleo
Cromosoma
Genes
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 X Y
Célula

El genoma humano (o dotación completa de ADN) está comprendido en los 22 cromosomas no sexuales más el cromosoma X y el cromosoma Y. Heredamos un conjunto de 23 cromosomas de cada progenitor.

Par de nucleótidos
Nucleótido
SNP
G G A G G A T C T G A G T C T G G T Individuo 1
G G A G G A T C T G A G T A T G G T Individuo 2
G G A G G A T C T G A G T A T G G T Individuo 3
Hebra sencilla del ADN
G G A G G A T C T G A G T C T G G T Individuo 4

Los estudios y los resultados

Los investigadores esperaban identificar variantes génicas responsables de las principales enfermedades mediante la comparación de los nucleótidos de los SNP frecuentes en el genoma de personas enfermas y de personas sanas. Dado que las variantes de los SNP (alelos) y los genes cercanos que codifican proteínas tienden a heredarse juntos, se esperaba que los alelos SNP predominantes en las personas enfermas señalasen las variantes génicas frecuentes responsables de la enfermedad. Estos estudios de asociación del genoma completo (GWAS) han descubierto numerosos alelos SNP asociados a ciertas enfermedades. Sin embargo, las variaciones descritas hasta la fecha han permitido explicar sólo una pequeña parte del riesgo de padecer una enfermedad.

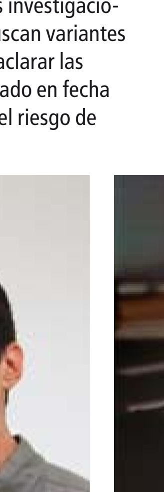
Alelo SNP asociado a la enfermedad
Variante génica cercana
Enfermo
Enfermo
Enfermo
Sano
Sano

BRYAN CHRISTIE

Opiniones divergentes

Entre los científicos con un discurso más claro sobre la mejor manera de avanzar en el conocimiento de las bases genéticas de las enfermedades complejas frecuentes se halla Francis S. Collins (*a la derecha, arriba*), director del Instituto Nacional de la Salud, quien afirma que la identificación de las variantes génicas frecuentes asociadas a enfermedades representa una poderosa estrategia para obtener resultados de utilidad médica. Mary-Claire King (*a la derecha, abajo*), de la Universidad de Washington, sostiene que tiene más sentido buscar variantes génicas raras implicadas en la enfermedad. Ella y otros señalan las investigaciones llevadas a cabo por Helen H. Hobbs y Jonathan C. Cohen (*abajo*), que buscan variantes génicas raras responsables de situaciones extremas, como un modelo para aclarar las causas que originan las enfermedades más frecuentes. Este trabajo ha revelado en fecha reciente un importante objetivo hacia el cual dirigir fármacos que reduzcan el riesgo de enfermedad coronaria en la población general.







la población. En lugar de ello, sostenían que la susceptibilidad ante las enfermedades complejas derivaría de la herencia de múltiples variantes raras, cuyo número ascendería a varios cientos —quizá miles— en un individuo concreto. En el idioma de Tolstói, las personas enfermas son, en cierto modo, genéticamente desafortunadas. Viniendo de alguien que se autodefinía como "fanático", el argumento no convenció a mucha gente.

La forma obvia de determinar quién tenía razón hubiese sido secuenciar los genomas completos de individuos enfermos y de individuos sanos y, mediante potentes ordenadores, identificar las variaciones en el ADN que aparecían en los primeros pero no en los segundos. A diferencia de los estudios genéticos tradicionales, que se basaban en la sospecha de que un gen concreto influía en una enfermedad, esas comparaciones "imparciales" arrojarían cierta luz sobre las partes de ADN responsables de la enfermedad, incluidas las que antes no se habían considerado importantes. Pero hace diez años resultaba técnicamente imposible adoptar esa estrategia y la hipótesis de las variantes frecuentes —de ser correcta— proporcionaba un atajo para descubrir genes responsables de enfermedades comunes.

Los expertos en genómica que seguían defendiendo la hipótesis de las variantes frecuentes comenzaron a planificar estudios de asociación del genoma completo (cuyas siglas inglesas corresponden a GWAS). Se trata de estudios a gran escala que parten de la existencia de unos marcadores en el ADN, los polimorfismos de un único nucleótido o (SNP, de *single nucleotide polymorphism*), para descubrir variantes génicas frecuentes responsables de enfermedades. Los SNP, que se hallan dispersos por todos los cromosomas, son regiones de ADN (aunque no necesariamente genes) en las que una única letra del código genético (nucleótido) en una posición determinada varía de una persona a otra. El plan consistía en examinar un gran número de los distintos SNP que suelen existir entre personas para determinar las versiones predominantes entre quienes padecen ciertas enfermedades. A continuación, los SNP asociados estadísticamente a la enfermedad permitirían identificar variantes génicas cercanas (heredadas junto con los marcadores) que serían responsables de la enfermedad.

JAMES D. WILSON *Getty Images* (*Collins*); CORTESIA DE MARY-CLAIRE KING (*King*); CORTESIA DEL HOSPITAL DEL SUDOESTE DE LA UNIVERSIDAD DE TEXAS EN DALLAS (*Hobbs y Cohen*)

Sin embargo, la estrategia exigía la construcción de un atlas, por así decirlo, de los SNP humanos frecuentes. Durante el último decenio, los biólogos han ido describiendo un número cada vez mayor de SNP. Los han venido utilizando para orientar su búsqueda de la causa genética de las enfermedades, que comenzó en 1998 con el Consorcio SNP (que construyó mapas que indicaban la ubicación de esos marcadores en cada cromosoma humano) y que ha ido progresando hasta convertirse en el HapMap (que ha catalogado conjuntos más amplios de SNP denominados haplotipos). En los últimos cinco años, los estudios de asociación del genoma completo han analizado cientos de miles de SNP frecuentes en los genomas de decenas de miles de pacientes y personas sanas.

Ahí es donde aparece la fisura que divide a la comunidad científica. Lander y otros consideran que el reciente descubrimiento de SNP frecuentes asociados a enfermedades representa la vía de entrada para lograr importantes avances médicos. De hecho, una reciente avalancha de artículos científicos firmados por consorcios dedicados al estudio del genoma ha descrito cientos de SNP frecuentes asociados a la esquizofrenia, la diabetes de tipo 2, la enfermedad de Alzheimer y la hipertensión. No obstante, otros señalan que, hasta el momento, los datos no han resultado muy útiles a la hora de predecir el riesgo de una enfermedad. Por ejemplo, en la diabetes de tipo 2, los estudios de asociación que han analizado 2,2 millones de SNP en más de 10.000 personas han identificado 18 SNP relacionados con la afección y, sin embargo, esas regiones explican sólo el 6 por ciento de la heredabilidad total de la enfermedad; y según Goldstein, de la Universidad Duke, apenas contribuyen a aclarar la causa biológica.

En 2008 Goldstein declaró al *New York Times*: "Resulta asombroso que hayamos descifrado el genoma humano y podamos observar la dotación completa de variantes génicas frecuentes, pero en cambio no hayamos descubierto casi nada." Este último verano, Goldstein habló sobre la hipótesis de las variantes frecuentes/enfermedades frecuentes y se refirió a ella como algo del pasado: "Hemos explorado esa vía y la hemos abandonado, puesto que no ha aportado la información que esperábamos".

David Botstein, de la Universidad Princeton, emite prácticamente el mismo veredicto en relación con la estrategia de crear un mapa de haplotipos: "Tenía que hacerse. De no haberse intentado, nadie sabría que no funcionaba". Afirma que el HapMap, que ha costado 138 millones de dólares, resultó un "magnífico fracaso".

Walter Bodmer, uno de los primeros en proponer el Proyecto Genoma Humano y pionero de los estudios de asociación que han dominado la genómica reciente, afirma que la búsqueda de las variantes génicas frecuentes representa un callejón sin salida. Según él, resulta casi imposible determinar los efectos biológicos de esas variantes génicas, un aspecto realmente crucial. La gran mayoría de las variantes frecuentes no han arrojado ninguna luz sobre la biología de las enfermedades.

Nuevas vías para avanzar

La actual discusión en torno a la hipótesis de las variantes frecuentes no es simplemente un debate científico arcano. Plantea la necesidad de un método alternativo para ayudar a resolver lo que muchos denominan el problema de la "heredabilidad perdida", al menos a corto plazo. Bodmer ha estado animando a los investigadores a dirigir su punto de mira hacia las variantes génicas raras. La línea divisoria entre una variante rara y otra frecuente no está bien definida; "rara", según Bodmer, hace referencia a una determinada mutación genética que afecta entre el 0,1 y el 1 o 2 por ciento de la población (una frecuencia muy por debajo de la resolución que ofrece la mayoría de los actuales estudios de asociación del genoma completo). Pero la principal idea de la hipótesis es que las variantes génicas con efectos notables sobre la enfermedad tienden a ser raras, mientras que las frecuentes casi siempre ejercen efectos insignificantes o neutrales.

Ese mismo argumento expusieron King y McClellan en un ensayo publicado en *Cell*. El ensayo suscitó la pasada primavera gran animosidad entre los estudiosos del genoma. Lander lo desestimó tachándolo de "artículo de opinión". King, que ha descubierto cientos de variantes raras en los genes *BRCA1* y *BRCA2* que provocan el cáncer de mama familiar, y McClellan, que ha descubierto asimismo múltiples variantes raras que contribuyen a la esquizofrenia, sugieren un "nuevo paradigma" para comprender las enfermedades complejas. Proponen que la mayoría de esas enfermedades son "heterogéneas" (muchas mutaciones distintas en muchos genes distintos causarían la misma enfermedad), que la mayoría de las mutaciones de alto impacto son raras y que numerosas variantes génicas raras se han incorporado hace poco al acervo génico. Por tanto, las variantes raras identificadas en pacientes permitirían conocer las rutas moleculares relacionadas con una enfermedad concreta, información que serviría para idear nuevas intervenciones terapéuticas.

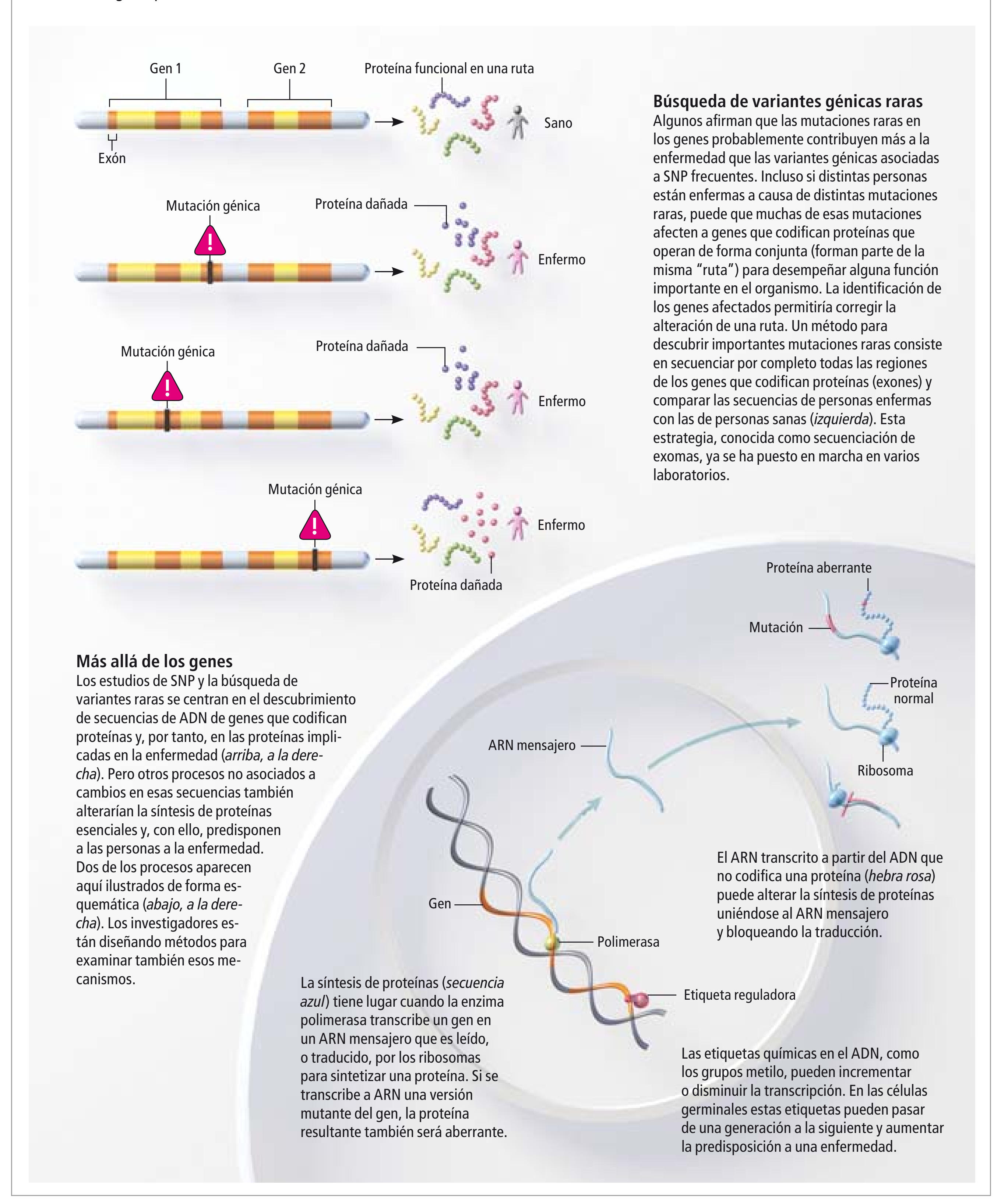
El autor

Stephen S. Hall viene escribiendo e informando sobre el Proyecto Genoma Humano desde hace más de 20 años. Ha escrito profusamente sobre ciencia contemporánea.

En el debate actual en torno a la hipótesis de las variantes frecuentes se plantea la necesidad de un nuevo método para resolver el problema de la "heredabilidad perdida"

¿Y ahora qué?

Los científicos que intentan identificar los rasgos heredables de las enfermedades frecuentes defienden el empleo de estrategias que no dependan de extensos análisis estadísticos de SNP frecuentes; algunos sostienen que éstos seguramente no aportarán mucha información sobre el riesgo de padecer una enfermedad.



Búsqueda de variantes génicas raras
Algunos afirman que las mutaciones raras en los genes probablemente contribuyen más a la enfermedad que las variantes génicas asociadas a SNP frecuentes. Incluso si distintas personas están enfermas a causa de distintas mutaciones raras, puede que muchas de esas mutaciones afecten a genes que codifican proteínas que operan de forma conjunta (forman parte de la misma "ruta") para desempeñar alguna función importante en el organismo. La identificación de los genes afectados permitiría corregir la alteración de una ruta. Un método para descubrir importantes mutaciones raras consiste en secuenciar por completo todas las regiones de los genes que codifican proteínas (exones) y comparar las secuencias de personas enfermas con las de personas sanas (*izquierda*). Esta estrategia, conocida como secuenciación de exomas, ya se ha puesto en marcha en varios laboratorios.

Más allá de los genes
Los estudios de SNP y la búsqueda de variantes raras se centran en el descubrimiento de secuencias de ADN de genes que codifican proteínas y, por tanto, en las proteínas implicadas en la enfermedad (*arriba, a la derecha*). Pero otros procesos no asociados a cambios en esas secuencias también alterarían la síntesis de proteínas esenciales y, con ello, predisponen a las personas a la enfermedad. Dos de los procesos aparecen aquí ilustrados de forma esquemática (*abajo, a la derecha*). Los investigadores están diseñando métodos para examinar también esos mecanismos.

La síntesis de proteínas (*secuencia azul*) tiene lugar cuando la enzima polimerasa transcribe un gen en un ARN mensajero que es leído, o traducido, por los ribosomas para sintetizar una proteína. Si se transcribe a ARN una versión mutante del gen, la proteína resultante también será aberrante.

El ARN transcrito a partir del ADN que no codifica una proteína (*hebra rosa*) puede alterar la síntesis de proteínas uniéndose al ARN mensajero y bloqueando la traducción.

Las etiquetas químicas en el ADN, como los grupos metilo, pueden incrementar o disminuir la transcripción. En las células germinales estas etiquetas pueden pasar de una generación a la siguiente y aumentar la predisposición a una enfermedad.

BRYAN CHRISTIE

Bodmer, los autores del ensayo publicado en *Cell* y otros señalan el trabajo de Hellen H. Hobbs y Jonathan C. Cohen como modelo a seguir a la hora de desentrañar la información relevante del genoma. La estrategia de Hobbs-Cohen se centra en los casos extremos de una enfermedad. Parte de la idea de que las variantes génicas raras que alteran sobremanera los procesos biológicos son responsables de los casos extremos y se pueden distinguir claramente. También define los genes que se deberían analizar en esas personas, sobre la base del conocimiento de los procesos biológicos. Y propone secuenciar determinados genes "sospechosos" para identificar variaciones entre las personas —que aunque sutiles, alteran de forma espectacular su función—, en lugar de utilizar las asociaciones de SNP, que pueden indicar la proximidad genética de un gen relacionado con la enfermedad pero no el gen en sí mismo.

En 2000, cuando todas las miradas se dirigían hacia la carrera entre J. Craig Venter, fundador de la empresa biotecnológica Celera Genomics, y los científicos del NIH para generar el primer borrador de la secuencia del genoma humano, Hobbs y Cohen se embarcaron discretamente en el proyecto "Dallas Heart Study" (estudio sobre la salud cardiovascular en la población de Dallas) para desentrañar las causas de la enfermedad coronaria. Durante años, Cohen, fisiólogo sudafricano, había estudiado el metabolismo del colesterol (su síntesis y descomposición). Hobbs, que se formó en medicina y en la actualidad es investigadora del Instituto Médico Howard Hughes ubicado en el Hospital del Sudoeste de la Universidad de Texas, en Dallas, había llevado a cabo su investigación en el laboratorio de Michael S. Brown y Joseph L. Goldstein, quienes compartieron en 1985 el premio Nobel por su trabajo sobre el metabolismo del colesterol. Ese trabajo sentó las bases para el desarrollo de las estatinas, medicamentos que se emplean para rebajar los niveles de colesterol de la sangre.

Hobbs y Cohen orientaron sus estudios siguiendo una "intuición" biológica, una estrategia totalmente distinta de la que empleaban la mayoría de los expertos en genómica. Reclutaron alrededor de 3500 residentes del condado de Dallas (la mitad de ellos afroamericanos) y, a continuación, les sometieron a una extensa serie de pruebas médicas. No sólo se centraron en el genoma (aunque recogieron muestras de ADN de todos ellos), sino que analizaron con precisión numerosos factores de riesgo de arteriopatía coronaria: parámetros bioquímicos de la sangre (incluido el colesterol), metabolismo, grasa corporal, función cardiaca, aumento del espesor de las arterias (determinado con técnicas de diagnóstico por imagen) e influencia del entorno. Durante dos años construyeron una enorme y detallada base de datos sobre los rasgos físicos individuales (fenotipos).

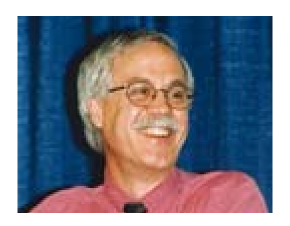
A continuación, examinaron el genoma de las personas con fenotipos extremos; en concreto, las que presentaban valores muy altos o muy bajos de lipoproteínas de alta densidad (HDL, denominado con frecuencia "colesterol bueno") o de lipoproteínas de baja densidad (LDL, el "colesterol malo"). Su búsqueda en el genoma no tenía nada de imparcial. En palabras de Cohen: "Llegamos hasta aquí a partir de un punto de vista más funcional".

Según informaron en *Science* en 2004, primero analizaron a los pacientes con concentraciones muy bajas de HDL en sangre, una situación que incrementa el riesgo de enfermedad coronaria. Sabían que había tres genes implicados en trastornos raros del metabolismo del colesterol y, por tanto, compararon las secuencias de ADN de esos genes de personas con niveles muy bajos de HDL con las de pacientes con niveles muy elevados. Hallaron una serie de variantes raras asociadas a los valores extraordinariamente pequeños de HDL observaron también que las mutaciones en los genes en cuestión contribuían a los bajos niveles de HDL en la población general.

En 2005, Hobbs y Cohen desviaron su atención hacia los participantes del estudio de Dallas con unos valores excepcionalmente bajos de LDL. Tuvieron un golpe de suerte al analizar las secuencias de ADN del gen *PCSK9*, que se sabía intervenía en el metabolismo del colesterol. Dos mutaciones que silenciaban el gen estaban relacionadas con los niveles bajos de LDL. En un estudio posterior en el que se examinaron los datos recopilados a lo largo de 15 años en poblaciones de Mississippi, Carolina del Norte, Minnesota y Maryland, Hobbs y Cohen determinaron que los afroamericanos con una de las dos mutaciones en *PCSK9* presentaban una disminución del 28 por ciento en los niveles de LDL y una disminución del 88 por ciento del riesgo de enfermedad coronaria. En los individuos de raza blanca, una mutación en ese mismo gen reducía un 15 por ciento los niveles de LDL y un 47 por ciento el riesgo de enfermedad coronaria. Prácticamente ninguno de los cientos de estudios de asociación del genoma completo ha identificado genes con un efecto tan notable sobre el riesgo de padecer una enfermedad.

Las compañías farmacéuticas ya están ensayando moléculas que desactivan el gen *PCSK9*

Hoy día la definición de gen resulta controvertida, más aún si se trata de un gen de interés médico, dado los múltiples niveles de complejidad que intervienen en ella



JOSEPH H. NADEAU ha demostrado en ratones la herencia de rasgos adquiridos.

CORTESIA DE JOSEPH H. NADEAU

o que alteran la ruta molecular afectada por el gen, en un intento por rebajar los valores de LDL y reducir el riesgo de enfermedad coronaria en la población general. En opinión de Hobbs, el gen *PCSK9* se sitúa en la lista de los diez principales objetivos de estudio de casi todas las compañías farmacéuticas.

Tras admitir el efecto reducido de los genes identificados por medio de la estrategia de las variantes frecuentes y animados por el éxito del trabajo de Hobbs y Cohen, David Goldstein y Elizabeth T. Cirulli, también en la Universidad Duke, propusieron hace poco ampliar la búsqueda de variantes raras de interés médico. Una idea consistía en secuenciar y comparar "exomas" completos de personas cuidadosamente seleccionadas. El exoma es un conjunto de regiones de genes que codifican proteínas en los cromosomas (exones), junto con regiones colindantes que regulan la actividad del gen; no incluye los segmentos de ADN situados entre exones o entre genes. Cirulli y Goldstein también sugieren buscar estas variantes raras en familias afectadas por una enfermedad frecuente o en personas que comparten un rasgo extremo, en las que se podrían identificar con mayor facilidad diferencias importantes en el ADN. Este trabajo ya se está llevando a cabo en muchos laboratorios. Sin embargo, la secuenciación de exomas es una estrategia provisional que resulta útil mientras no se disponga de técnicas de secuenciación del genoma completo baratas y fiables, algo que probablemente ocurrirá dentro de tres o cinco años.

Aventurarse hacia lo desconocido

Unas pocas voces se atreven a afirmar que para profundizar en el conocimiento de la biología humana no bastan el estudio de las secuencias de ADN y de las proteínas. Opinan que la genética tradicional no permite conocer la complejidad molecular de los genes y su papel en la enfermedad. Se sabe ahora que las vastas regiones de ADN no codificante, en un tiempo descartadas y consideradas inútiles, desempeñan importantes funciones reguladoras. Algunos segmentos de ADN producen así pequeñas moléculas de ARN que interfieren con la expresión génica. También afectan la expresión de los genes ciertas "etiquetas" químicas que se unen al ADN sin alterar su secuencia —son por tanto epigenéticas— y pueden ser modificadas a lo largo de la vida por factores ambientales. Este ADN modificado por el entorno llega incluso a transmitirse a la descendencia.

Hoy día la definición de gen resulta controvertida, más aún si se trata de un gen de interés médico, dado los múltiples niveles de complejidad que intervienen en ella. Lo que en una época se consideraba una relación directa y unidireccional entre los genes y los rasgos se ha convertido ahora en el "problema genotipo-fenotipo", donde el conocimiento de la secuencia de ADN que codifica una proteína sólo nos informa en parte acerca de un rasgo.

En experimentos realizados con animales, Joseph H. Nadeau, director de desarrollo científico del Instituto de Biología de Sistemas, en Seattle, ha examinado más de 100 rasgos bioquímicos, fisiológicos y conductuales afectados por cambios epigenéticos. Ha observado que algunos de los cambios se transmitían a lo largo de cuatro generaciones. "¡Es totalmente lamarckiano!", comenta, refiriéndose a la idea del biólogo del siglo XVIII Jean-Baptiste Lamarck de que los rasgos adquiridos se podían heredar.

Como si ese nivel de complejidad no fuese suficiente, Nadeau posee datos experimentales de que, en ocasiones, la función de un determinado gen depende del conjunto específico de variantes génicas que le rodean, un efecto que aporta un toque contextual y posmoderno a las explicaciones genéticas de la enfermedad. Según Nadeau, se puede seguir el rastro de algunas enfermedades frecuentes para llegar, en última instancia, a un número muy elevado de genes que forman parte de un entramado o de una ruta y cuyos efectos dependen de las variantes génicas que presente una persona; una variante génica podría entonces exacerbar o contrarrestar el efecto de otro gen del grupo que esté relacionado con la enfermedad. Nadeau afirma: "Seguramente descubriremos que este tipo de herencia es más habitual de lo que habíamos esperado".

Aún no se sabe con exactitud la importancia de los factores propuestos por Nadeau en el riesgo de padecer una enfermedad. Mientras tanto, una nueva generación de técnicas de secuenciación rápidas y baratas permitirá muy pronto comparar genomas enteros. Entonces, el debate entre variantes frecuentes y raras se convertirá en historia. Lejos de empañar el campo, la actual incógnita de la heredabilidad perdida ha hecho que incluso King, quien contempla con escepticismo la hipótesis de las variantes frecuentes, se entusiasme con lo que está por llegar en los próximos años y afirme que poseemos las herramientas para abordar estas cuestiones de forma apropiada: "Imagine lo que Darwin y Mendel harían con las técnicas de hoy. Es un momento fabuloso para trabajar en genómica". Sin embargo, en esta ocasión nadie se atreve a establecer un calendario con los grandes avances médicos del futuro.

PARA SABER MAS

SEQUENCE VARIATION IN PCSK9, LOW LDL, AND PROTECTION AGAINST CORONARY HEART DISEASE. Jonathan C. Cohen y col. en *New England Journal of Medicine*, vol. 354, n.º 12, págs. 1264-1272; 23 de marzo de 2006.

FINDING THE MISSING HERITABILITY OF COMPLEX DISEASES. Teri A. Manolio, Francis S. Collins, Nancy J. Cox y col. en *Nature*, vol. 461, págs. 747-753; 8 de octubre de 2009.

TRANSGENERATIONAL GENETIC EFFECTS ON PHENOTYPIC VARIATION AND DISEASE RISK. Joseph H. Nadeau en *Human Molecular Genetics*, vol. 18, págs. R202-R210; 15 de octubre de 2009.

GENETIC HETEROGENEITY IN HUMAN DISEASE. Jon McClellan y Mary-Claire King en *Cell*, vol. 141, págs. 210-217; 16 de abril de 2010.

GENOMIC MEDICINE-AN UPDATED PRIMER. W. Gregory Feero, Alan E. Guttmacher y Francis S. Collins en *New England Journal of Medicine*, vol. 362, n.º 21, págs. 2001-2011; 27 de mayo de 2010.

UNCOVERING THE ROLES OF RARE VARIANTS IN COMMON DISEASE THROUGH WHOLE-GENOME SEQUENCING. Elizabeth T. Cirulli y David B. Goldstein en *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, págs. 415-425; junio de 2010.



Fritos

Las altas temperaturas del aceite producen una textura crujiente y un gusto característico

Pere Castells

La fritura constituye una de las técnicas más antiguas de cocción de alimentos. Los fritos gozan de una popularidad cada vez mayor; los consumen personas de todas las edades. Ello se debe a su sabor y aroma distintivos, un aspecto atractivo y una textura crujiente. Además, su preparación suele ser fácil y rápida. Y su seguridad microbiológica prácticamente total.

La definición de freír nos indica ya los parámetros característicos de este tipo de cocción: sumergir total o parcialmente los productos alimentarios en un baño de grasa a temperaturas superiores a 150 ºC, donde el lípido, al transmitir el calor, produce un calentamiento rápido del alimento. Las temperaturas elevadas que se alcanzan al freír logran una penetración más rápida y uniforme del calor hacia el interior del producto que se está cocinando; al propio tiempo, favorecen la reacción de pardeamiento de Maillard y una rápida deshidratación, lo que resulta en un acabado crujiente.

Un elemento clave en este tipo de cocción es la grasa utilizada. Distinguimos entre el aceite y la masa de freír. Ambos pueden tener un origen animal o vegetal. Sin embargo, a temperatura ambiente el aceite se halla en estado líquido y la masa en estado sólido.

El aceite de oliva es el más emblemático del área mediterránea. El virgen se obtiene sólo mediante procedimientos mecánicos, prensado en frío a temperaturas inferiores a 35 ºC. El denominado aceite de oliva corresponde a una mezcla de virgen y de aceite refinado obtenido por técnicas de extracción, pero sin modificar la estructura básica. Y finalmente encontramos también el aceite de sansa refinado, que procede de la pasta de prensado (sansa u orujo).

© iStockphoto/JUANMONINO (arriba); ERMIN GUTENBERGER (abajo)



A nivel mundial, los aceites más utilizados para freír son los de semillas: de soja, cacahuete, girasol, girasol alto oleico, algodón, germen de trigo, colza, semillas de uva y mezclas de éstos. Las masas de freír pueden catalogarse en grasas animales (grasa de cerdo) y vegetales (mantecas de cacao, coco y palma). También entrarían en este apartado las grasas anhidras y las margarinas.

Si freímos con una olla o una sartén, obtendremos un calentamiento exterior de la grasa. En una freidora, en cambio, el calentamiento es interior.

Los fritos más elementales son sin cobertura (directos). En éstos, el alimento se sumerge directamente en el aceite o masa de freír; el ejemplo más conocido corresponde a las patatas fritas. Otra técnica popular es el enharinado (con cobertura), donde el producto se cubre de harina o almidón antes de freír. Denominada en España “fritura andaluza”, es la que encontramos en sardinas, boquerones y otros pescados fritos. Se obtiene otro tipo de cobertura al recubrir el alimento con una primera capa de encolante (huevo) y otra posterior de pan rallado, para después freírlo. Nos referimos al “empanado”, que suele aplicarse a los filetes de pollo (escalopa), aros de cebolla, etcétera.

En esta categoría se incluiría también el rebozado, un recubrimiento con harina y luego con huevo. Un ejemplo importante son los calamares rebozados (“a la romana” en algunas zonas). Témpura, Orly y pastina, entre otras, pertenecen también a las técnicas de rebozado.

A la hora de preparar un frito, el cocinero se enfrenta a un verdadero reto. ¿Cómo lograr que los alimentos adquieran la textura y el color apropiados, sin absorber demasiado aceite y sin que éste pierda su calidad organoléptica y sanitaria?

Existen numerosos trabajos científicos sobre las frituras. En 2007, Enrique Barrado, de la Universidad de Valladolid, y sus colaboradores publicaron en *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria* una investigación sobre el contenido graso de diversos alimentos. Entre ellos destacaron las hamburguesas y las patatas fritas, con un 50 y un 35 por ciento de grasas respectivamente.

La cocción a altas temperaturas puede generar compuestos tóxicos. Para evitar la presencia de acrilamida en las patatas fritas, las autoridades alimentarias y sanitarias recomiendan remojarlas y escaldarlas antes de freírlas, y mejor en medio ácido. A partir de la revisión de numerosos trabajos, en el Centro de Investigación y Desarrollo en Grasas y Aceites de la Universidad de Chile han recogido una serie de normas y parámetros de producción y comercialización que permiten reducir el contenido de acrilamida en alimentos.

En lo que atañe al aparato de freír, se recomienda usar freidoras con control de temperatura y resistencia eléctrica en el interior; en una olla se degrada más rápidamente el aceite y es muy difícil controlar la temperatura de fritura. Los alimentos deben secarse previamente para evitar accidentes provocados por la evaporación rápida del agua residual. Estos deben quedar perfectamente sumergidos para uniformizar la cocción. No dejar que el aceite humee, pues ello es sinónimo de degradación. Por fin, después de freír, se aconseja filtrar el aceite, ya que los restos de alimentos facilitan que éste se degrade. Sería deseable que las freidoras del futuro llevaran incorporado un detector de calidad del aceite. Así podríamos degustar fritos más saludables.

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

Una ventosa sensacional

Frank W. Grasso

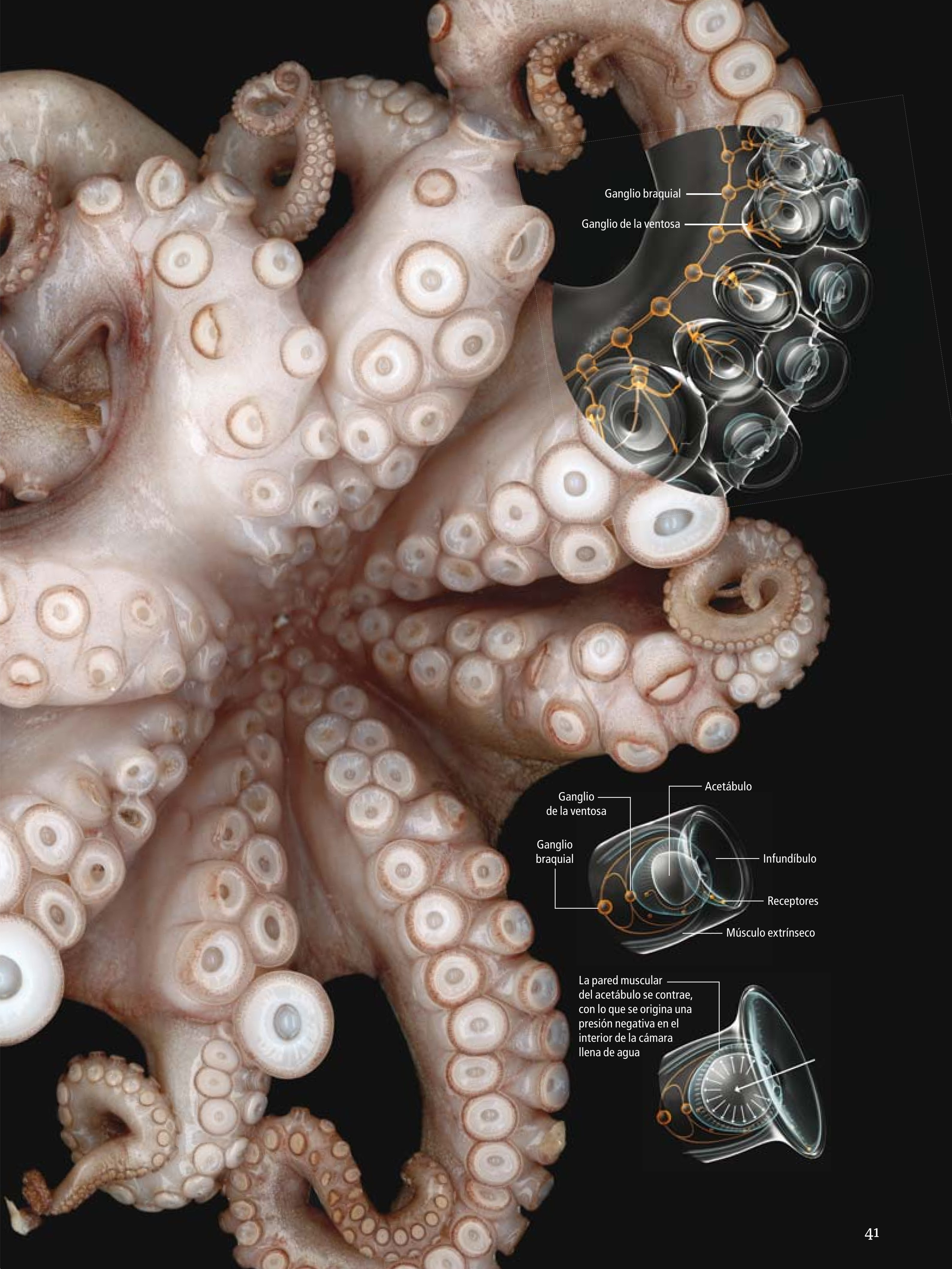
A primera vista, la ventosa de un pulpo se parece a la pieza cóncava que remata un dardo de juguete o que fija un GPS al parabrisas de un automóvil. En realidad, se trata de un órgano de complejidad extraordinaria que no sólo se fija a objetos con distinta fuerza, sino que también los manipula, gracias a grupos de músculos especializados.

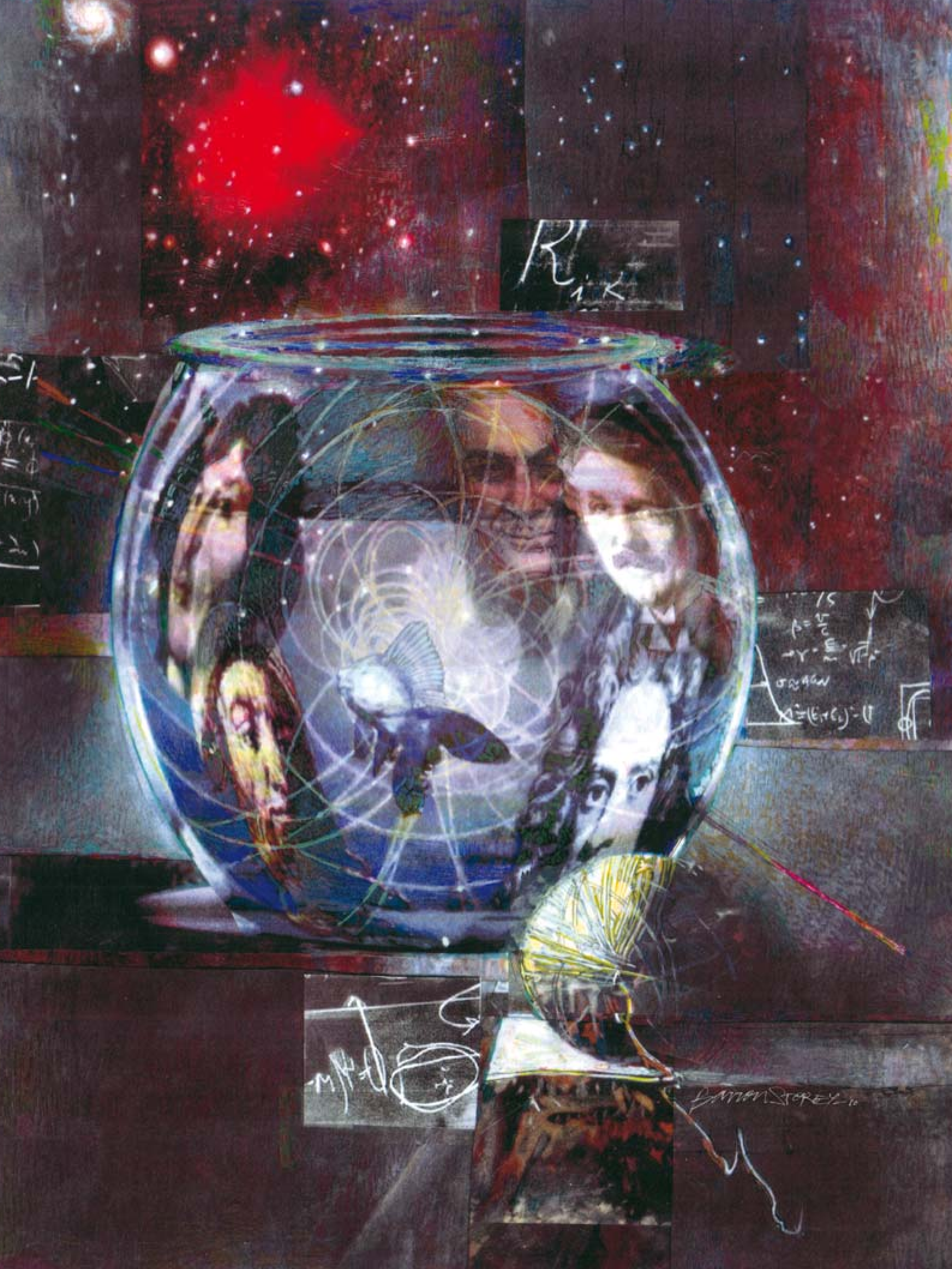
La ventosa presenta dos cámaras: la exterior, o infundíbulo, y la interior, o acetábulo. Cuando se fija a un objeto (una sabrosa almeja, por ejemplo), los músculos del infundíbulo modelan el borde de la ventosa para que se ajuste a la superficie de la concha, que queda así sellada. Entonces los músculos del acetábulo se contraen; se crea una fuerte presión negativa en el interior de la ventosa, lleno de agua, con respecto a la del agua de mar del exterior. Esta presión diferencial genera succión. Cuanto más se contraen los músculos del acetábulo, mayor es la presión negativa y más firme el agarre de la ventosa. Mientras tanto, los músculos extrínsecos permiten que el borde de la ventosa gire el objeto en un círculo completo, con un ángulo llano o agudo en relación al brazo, sin que desaparezca el efecto de sellado ni se reduzca la presión diferencial.

Además de una musculatura compleja, las ventosas del pulpo poseen unos intrincados circuitos neurales. Los quimiorreceptores, neuronas especializadas que ocupan el borde de la ventosa, permiten identificar el sabor de las superficies. Junto con mecanorreceptores y proprioceptores (que transmiten información acerca del tacto y la presión y sobre la actividad muscular, respectivamente), los quimiorreceptores emiten las señales a un grupo de neuronas, una suerte de "minicerebro" de la ventosa, que recibe información sensorial y organiza respuestas coherentes. Los ganglios de las ventosas se hallan conectados entre sí mediante una cadena de ganglios braquiales de mayor tamaño que recorren longitudinalmente los brazos o tentáculos y controlan los movimientos de estos últimos. De ahí que las ventosas contiguas entre sí puedan coordinar sus movimientos sin necesitar la dirección constante del cerebro real (como desplazar un objeto arriba o abajo del tentáculo). Queda por determinar de qué manera el cerebro y los ganglios de brazos y ventosas se reparten las funciones neurales.



BRYAN CHRISTIE *(ilustración)*; NEWMANN/CORBIS *(fotografía)*


Ganglio braquial
Ganglio de la ventosa
Acetábulo
Ganglio
de la ventosa
Ganglio
braquial
Infundíbulo
Receptores
Músculo extrínseco
La pared muscular
del acetábulo se contrae,
con lo que se origina una
presión negativa en el
interior de la cámara
llena de agua



La (escurridiza) teoría del todo

Durante años, los físicos han buscado la teoría final que habría de unificar toda la física. Sin embargo, puede que tengan que acostumbrarse a convivir con varias

Stephen Hawking y Leonard Mlodinow

Hace unos años, el ayuntamiento de Monza, en Italia, prohibió a los habitantes de la localidad alojar peces en peceras curvas. Los artífices de la medida argumentaban sobre la crueldad de tales recipientes, ya que la forma de sus paredes proporcionaba al pez una visión distorsionada de la realidad. Aparte de la importancia de la medida para los pobres peces, la historia nos plantea una pregunta filosófica: ¿cómo sabemos que la realidad que percibimos es cierta? El pez cuenta con una visión de la realidad diferente de la nuestra, pero ¿podemos asegurar que es menos real? Por lo que sabemos, también nosotros podríamos habernos pasado la vida entera mirando a través de una lente que lo distorsionara todo.

En física la cuestión no es académica. De hecho, físicos y cosmólogos nos hallamos en una situación similar a la del pez. Durante décadas hemos luchado por hallar una teoría del todo: un conjunto completo y coherente de leyes fundamentales de la naturaleza que expliquen cada aspecto de la realidad. Sin embargo, puede que el resultado de dicha búsqueda no sea una teoría única, sino un conjunto de teorías interconectadas, cada una de las cuales describe su propia versión de la realidad, como si viera el universo a través de su pecera particular.

Puede que semejante idea resulte difícil de aceptar para muchos, incluidos algunos científicos en activo. La mayoría de la gente cree que existe algo así como una realidad objetiva y que nuestros sentidos y la ciencia nos aportan información directa acerca del mundo. La ciencia tradicional se basa en la creencia de que existe un mundo exterior con propiedades bien definidas e independientes del observador. En filosofía, tal creencia se denomina realismo.

Sin embargo, aquellos que recuerden a Timothy Leary y su defensa de la cultura psicodélica en los años sesenta saben de otra posibilidad: el concepto de realidad puede depender de la mente del observador. Los diferentes matices en la interpretación de este punto de vista han dado lugar a doctrinas como el antirrealismo, el instrumentalismo o el idealismo. De acuerdo con las mismas, el mundo que conocemos no es sino un constructo de la mente. La estructura interpretativa de nuestro cerebro emplea los datos sensoriales como materia prima y, a partir de ellos, da forma al mundo que percibimos. Puede que esta idea resulte difícil de aceptar, pero no es complicada de entender. A fin de cuentas, no hay forma de excluir al observador (nosotros) de su percepción del mundo.

La manera en que la física ha evolucionado hasta nuestros días ha hecho del realismo una postura cada vez más difícil de defender. En física clásica (la física de Newton, que de manera tan precisa describe nuestra experiencia cotidiana), la interpretación de términos como objeto o posición se halla de acuerdo, en gran medida, con la comprensión "realista" que emana de nuestro sentido común. Pero, como aparatos de medida, los humanos dejamos bastante que desear. Hoy sabemos que los objetos comunes y la luz que empleamos para verlos se hallan compuestos por ciertas partículas (como electrones y fotones) que no percibimos de manera directa. Y las leyes que gobiernan el comportamiento de las mismas no son las de la física clásica, sino las de la mecánica cuántica.

La realidad que describe la teoría cuántica supone una ruptura radical con respecto a la de la física clásica. En mecánica cuántica las partículas no poseen posiciones ni velocidades definidas. Sólo adquieren tales atributos cuando un observador los mide. En algunos casos, los objetos individuales ni siquiera tienen una existencia independiente, sino que existen sólo como parte de un conjunto mayor. La física cuántica también acarrea importantes implicaciones para nuestro concepto del pasado. En física clásica, el pasado existe como una serie definida de eventos. Pero, en física cuántica, el pasado (al igual que el futuro) es indefinido y existe sólo como un espectro de posibilidades. Incluso el universo como un todo no tiene

BARRON STOREY

CONCEPTOS BASICOS

- El trabajo de Stephen Hawking sobre los agujeros negros y el origen del universo puede calificarse como uno de los pasos más concretos encaminados a conciliar la gravedad y la física cuántica en una teoría del todo.
- Hoy día, la teoría de cuerdas constituye el principal candidato unificador. Sin embargo, ésta admite cinco formulaciones diferentes, cada una de las cuales sólo es aplicable en un conjunto restringido de situaciones.
- Esas cinco teorías de cuerdas se hallan conectadas matemáticamente. Dicha red, denominada de manera enigmática teoría M, bien podría ser la teoría final.
- En su reciente obra *El gran diseño*, Stephen Hawking y Leonard Mlodinow argumentan que la búsqueda de una teoría final quizá no produzca un conjunto único de ecuaciones. Toda teoría, afirman, lleva asociado su propio modelo de realidad, por lo que intentar determinar la verdadera naturaleza de la realidad quizá carezca de sentido. Este breve ensayo está basado en la obra.

un único pasado o historia. La física cuántica nos presenta una realidad muy diferente de la de la física clásica, por más que esta última concuerde con nuestra intuición y nos permita levantar edificios o puentes.

Tales ejemplos sugieren una interesante conclusión sobre la forma en que debemos interpretar la ciencia moderna: en nuestra opinión, el concepto de realidad nunca es independiente de la teoría usada para explicarla. En consecuencia, adoptamos un punto de vista que denominamos *realismo dependiente del modelo:* la idea de que una teoría física o una imagen del mundo consiste en un modelo (por lo general, de naturaleza matemática) y un conjunto de reglas que conectan los elementos del modelo con las observaciones. De acuerdo con esta doctrina, carece de sentido preguntarse si un modelo es real. Lo único que procede cuestionarse es si el modelo se halla o no en acuerdo con las observaciones. Si dos modelos concuerdan con el experimento, ninguno de ellos puede considerarse más real que el otro. Uno siempre será libre de elegir el modelo que le resulte más conveniente para describir la situación considerada.

Construcción de modelos

La idea de las realidades alternativas constituye un tema recurrente en la cultura popular. En el filme de ciencia ficción *Matrix*, los humanos viven, sin saberlo, en una realidad virtual generada por ordenadores inteligentes a fin de mantenerlos pacíficos e ignorantes del hecho de que, mientras tanto, las máquinas succionan su energía bioeléctrica —sea lo que sea esto—. ¿Cómo sabemos que no somos personajes generados por ordenador que viven en un mundo como el de *Matrix*? Si viviéramos en un mundo virtual, los sucesos no tendrían por qué seguir ninguna lógica ni por qué obedecer ley alguna. Los extraterrestres al mando de esa realidad quizá encontrasen interesante o divertido observar nuestra reacción si, de pronto, todo el mundo decidiera que el chocolate es repulsivo o que declarar la guerra carece de sentido. Algo así nunca ha sucedido. Pero, si los extraterrestres creasen leyes físicas coherentes, no habría forma de discernir otra realidad detrás de la simulada. Resulta tentador llamar "mundo real" a aquel en el que viven los extraterrestres y "mundo falso" al generado por ordenador. Pero si (como nosotros) los seres en el mundo simulado no pudieran observar su universo desde fuera, tampoco tendrían ninguna razón para dudar de su representación de la realidad.

Los peces se encuentran en una situación similar. Su visión no es la misma que la nuestra, pero siempre podrían formular leyes científicas que rigiesen el movimiento de los objetos exteriores. Puesto que la luz se curva al pasar del aire al agua, un objeto que, visto desde fuera, se moviese con velocidad constante y en línea recta sería visto por el pez como si siguiese una trayectoria curva. Pero el pez podría formular leyes científicas desde su sistema de referencia distorsionado. Las mismas siempre serían ciertas y le permitirían predecir el movimiento de los objetos fuera de la pecera. Sus leyes serían más complicadas que las nuestras, pero la simplicidad no es más que una cuestión de gusto. Si el pez formulara su teoría, tendríamos que admitir su punto de vista como una descripción válida de la realidad.

Un conocido ejemplo lo constituyen el modelo geocéntrico de Ptolomeo y el modelo heliocéntrico de Copérnico. Aunque suele decirse que Copérnico invalidó el modelo de Ptolomeo, semejante conclusión es falsa. Al igual que en el ejemplo del pez, uno puede usar cualquiera de las dos descripciones como modelo del universo. Con independencia de nuestras suposiciones acerca de qué cuerpo, la Tierra o el Sol, se halla en reposo, ambas teorías explican las observaciones celestes. A pesar de su importancia en los debates filosóficos sobre la naturaleza del universo, la única ventaja del sistema copernicano reside en que las ecuaciones se tornan mucho más sencillas si elegimos como sistema de referencia aquel en el que el Sol se encuentra en reposo.

El realismo dependiente del modelo no sólo se aplica a los modelos científicos, sino también a los modelos (conscientes o inconscientes) que todos empleamos para interpretar el mundo cotidiano. Nuestro cerebro procesa un tosco caudal de datos procedentes del nervio óptico. Combina la información que le proporcionan ambos ojos, mejora la resolución y completa los espacios en blanco, como el que se produce en el punto ciego. Además, genera la impresión de un espacio tridimensional a partir de los datos en dos dimensiones que envía la retina. Cuando vemos una silla, sólo empleamos la luz reflejada por el objeto para construir una imagen mental (o modelo) de la silla. La eficacia de nuestro cerebro a la hora de construir modelos es tal que, aunque nos hallemos provistos de gafas que invierten la imagen, el cerebro modificará el modelo y, al

Los autores

El trabajo de **Stephen Hawking** estableció los fundamentos de la comprensión actual de los agujeros negros y el origen del universo. Desde 1979 hasta el año pasado ocupó la Cátedra Lucasiana de la Universidad de Cambridge, cargo que en su día ocupó Newton. Entre sus obras destaca el clásico *Historia del Tiempo*. **Leonard Mlodinow** es físico teórico en el Instituto de Tecnología de California. Es autor de varias obras, entre las que se encuentran *El andar del borracho: cómo el azar gobierna nuestras vidas* y *El arco iris de Feynman: la búsqueda de la belleza en la física y en la vida*.

poco, la silla volverá a aparecer en su posición habitual (con algo de suerte, antes de que intentemos sentarnos).

Destellos de una teoría profunda

En la búsqueda en pos de leyes definitivas de la física, ningún candidato ha generado mayor esperanza —ni más controversia— que la teoría de cuerdas. La misma fue propuesta en la década de los setenta como un intento de unificar todas las fuerzas de la naturaleza en un esquema coherente que, en particular, lograría compatibilizar la fuerza de la gravedad con las leyes de la física cuántica. Sin embargo, a principios de los noventa se descubrió que la teoría adolecía de un serio inconveniente: no había una única teoría de cuerdas, sino cinco.

El asunto dejaba en bastante mala posición a quienes propugnaban que la teoría de cuerdas constituía la única teoría del todo. Sin embargo, a mediados de los noventa se descubrió que esas cinco teorías (a las que se sumó otra más, la teoría de supergravedad en once dimensiones) describían, en realidad, los mismos fenómenos. Ello hizo que muchos albergasen la esperanza de que, algún día, todas esas versiones llegarían a unirse en una sola teoría. Todas esas teorías se encuentran relacionadas por dualidades: una especie de diccionarios matemáticos que traducen conceptos de una teoría a otra. Por desgracia, cada teoría sólo describe adecuadamente los fenómenos bajo determinadas condiciones (por ejemplo, a bajas energías), pero ninguna logra describir por sí sola cada aspecto del universo.



BARRON STOREY

Hoy día, los físicos se hallan convencidos de que las cinco teorías de cuerdas sólo representan aproximaciones diferentes a una teoría más fundamental, a la que se ha dado en llamar *teoría M*. (Nadie parece saber a qué alude la “M”; quizás a “maestro”, “milagro”, “misterio”, o a las tres a la vez.) Si bien es cierto que aún seguimos tratando de descifrar sus características, se diría que la esperanza de hallar una única teoría de la naturaleza se ha vuelto insostenible. Parece que, para explicar el universo, hemos de emplear una teoría u otra en función de la situación que deseemos describir. En este sentido, la teoría M no es una teoría en el sentido habitual, sino un conjunto de teorías. Ocurre con ella algo parecido a lo que sucede con los mapas: para representar de manera fidedigna la superficie de la Tierra sobre un plano, hemos de usar una colección de mapas, cada uno de los cuales cubre una región limitada. Los mapas se solapan y, en las zonas donde lo hacen, muestran el mismo paisaje. De manera similar, los miembros de la familia de la teoría M quizá parezcan muy diferentes, pero todos ellos pueden entenderse como versiones de una misma teoría subyacente. Y, en las zonas donde se solapan, todas esas teorías predicen los mismos fenómenos, si bien ninguna de ellas funciona bien en todas las situaciones.

Siempre que desarrollamos un modelo del mundo que tiene éxito en algún aspecto tendemos a atribuirle la cualidad de realidad o de verdad absoluta. Pero la teoría M, como el ejemplo del pez, muestra que una misma situación física puede modelizarse de varias maneras, cada una de las cuales emplea diferentes conceptos y elementos fundamentales. Es posible que para describir el universo hayamos de emplear teorías diferentes en situaciones distintas, y puede que cada teoría implique su propia versión de la realidad. Pero, de acuerdo con el realismo dependiente del modelo, tal diversidad es aceptable y ninguna de las versiones puede arrogarse la cualidad de ser más real que las restantes. Esto no se corresponde con lo que, a lo largo de la historia, los físicos han esperado de una teoría de la naturaleza. Tampoco casa bien con nuestra idea habitual de realidad. Pero quizá sea la manera en que el universo hace las cosas.

PARA SABER MAS

LA TEORIA M. Michael J. Duff en *Investigación y Ciencia*, abril de 1998.

EL ESPACIO, ¿UNA ILUSION? Juan Maldacena en *Investigación y Ciencia*, enero de 2006.

EL GRAN DISEÑO. Stephen Hawking y Leonard Mlodinow. Editorial Crítica, 2010.

El calendario chino

La astronomía al servicio del poder

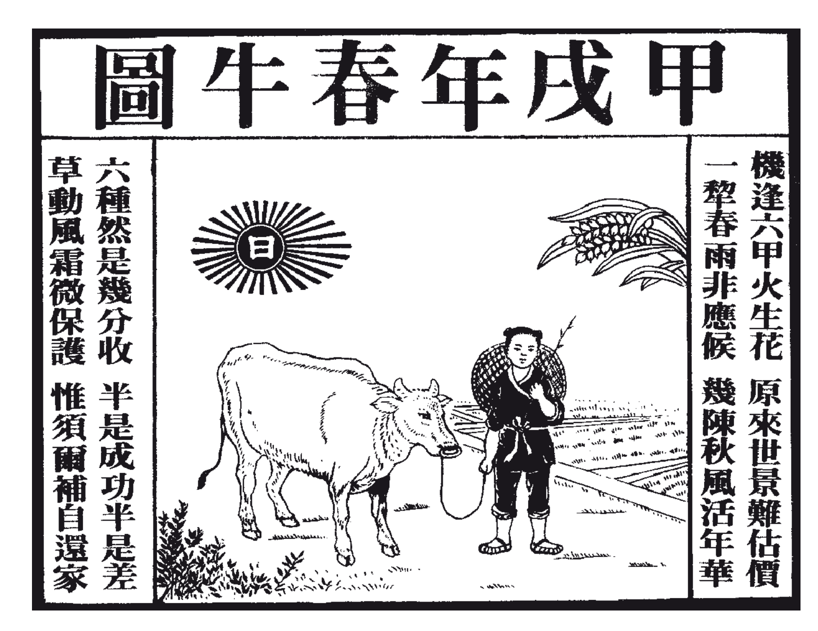
Jean-Claude Martzloff

Si le pregunta a un ciudadano chino por el año de su nacimiento, le responderá tal y como lo haríamos nosotros. Pero si la pregunta proviene de un compatriota, quizá conteste con alguno de los 60 símbolos del "ciclo de sesenta", la piedra angular del calendario tradicional chino. Este ciclo no astronómico, cuyo origen se remonta al segundo milenio antes de nuestra era o incluso más, jamás ha sufrido modificación alguna (*véase el recuadro* "El ciclo de sesenta"). Sin embargo, no puede decirse lo mismo del calendario en sí.

El calendario chino fue confeccionado a lo largo del primer milenio antes de nuestra era a partir de observaciones astronómicas y de sucesivas correcciones que tenían por objeto sincronizar los ciclos lunar y solar. Entre los años 104 a. C. y 1664, fue reformado más de cincuenta veces. Y ello no sólo se debió a las numerosas sucesiones dinásticas, sino, sobre todo, a la creencia china en la imposibilidad de determinar los movimientos celestes a muy largo plazo, una creencia que fue empleada por los gobernantes para afianzar su poder. Como veremos, tras las reformas del calendario se ocultaba un saber astronómico y matemático sumamente refinado.

El tiempo, un asunto de Estado

El calendario chino adoptó un carácter mixto (solar y lunar) durante el primer milenio antes de nuestra era, o quizás antes. En un principio fue exclusivamente lunar: la luna nueva debía marcar el comienzo de cada mes. A tal fin, se alternaban meses cavos (de 29 días) con meses plenos (de 30). Dado que semejante distribución arroja un promedio de 29,5 días por mes,





1. EL "BUEY DE PRIMAVERA" (*izquierda*) figuraba en la primera página de los almanaques oficiales durante el régimen imperial. Asociado a los antiguos ritos de fertilidad, dio lugar a las fiestas que celebraban el retorno de la primavera y, poco después, a las fiestas de año nuevo (*arriba*).

mientras que la duración media real de un mes lunar es de 29,53 días, la sincronización entre el comienzo del mes y la luna nueva no podía durar largo tiempo. En consecuencia, la concordancia se intentó restablecer mediante la adición de un día extra a ciertos meses inicialmente cavos.

Por otra parte, para relacionar el calendario con el ciclo estacional, los chinos definieron el año solar como el intervalo de tiempo medio entre dos solsticios de invierno consecutivos y fijaron el día como el tiempo transcurrido entre dos instantes de medianoche consecutivos. Dado que 12 meses lunares duraban unos 11 días menos que un año solar, para sincronizar el año lunar y solar comenzó a añadirse al calendario un mes adicional cuando el desfase entre ambos superaba la duración de un mes lunar. En un principio, dicho mes solía añadirse al finalizar el año.

Si bien el calendario chino estuvo sujeto a toda suerte de irregularidades durante largo tiempo, el primer día del primer mes lunar acabó por fijarse entre nuestros 15 de enero y 15 de febrero. Finalmente, a partir del año 140 a. C., se decidió que la numeración de los años lunares —tan numerosos como los solares— no retrotraería a una fecha simbólica fija (del estilo del nacimiento de Cristo, el de Buda, o el año de la refundación de Roma), sino que dependería de la instauración de las diferentes dinastías.

Poco a poco, y a fin de conferirle la máxima precisión posible, las unidades temporales básicas para el cálculo del calendario fueron haciéndose cada vez más cortas. Llegaron a ser del orden de la millonésima de día. Pero, dado que el calendario había de operar con números enteros de días, se tomaban las partes enteras de los valores calculados. Nacía así una oposición entre el tiempo casi continuo de los cálculos y el tiempo discreto del calendario civil.

Ante la imposibilidad de fijar un calendario lo bastante exacto (que concordase con las fases lunares y con los solsticios), entre los años 104 a. C. y 1664 se le encargó a un organismo estatal, la Oficina de Astronomía, la tarea de reformarlo. Tal deseo se inscribía en un amplio programa que aspiraba a elaborar diversas técnicas de previsión de fenómenos astronómicos útiles para la astrología, como los eclipses o las conjunciones planetarias.

CONCEPTOS BASICOS

- Entre los años 104 a. C. y 1644, el calendario chino sufrió un sinfín de reformas oficiales. Todas ellas fueron concebidas para hacerlo imprevisible de un año para otro.
- Sus cálculos, perfectamente racionales, se mantuvieron en secreto. Sólo el emperador recibía un calendario con todas las predicciones astrológicas.
- Algunas nociones astronómicas, como la duración media del año trópico o sus variaciones seculares, fueron descubiertas siglos antes que en Europa.

El ciclo de sesenta

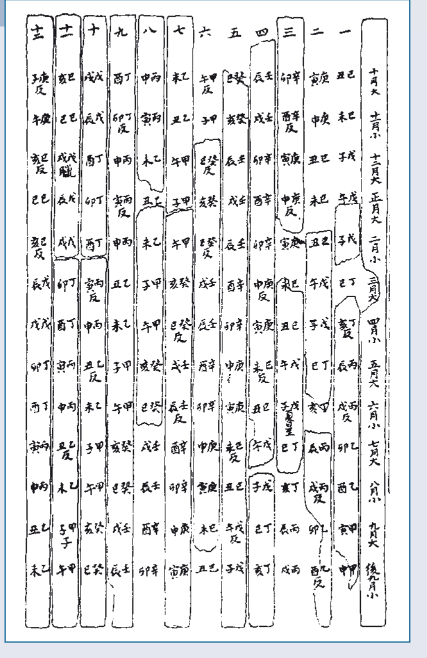
SEGUN LAS INSCRIPCIONES DE ORACULOS grabadas en huesos o conchas, los indicios más antiguos del calendario chino se remontan al año 1500 a. C. Consisten en recuentos de días agrupados de sesenta en sesenta que, sin ninguna relación con la astronomía, señalaban los días asociados a ceremonias de carácter animista. En lugar de contar los días de 1 a 60 mediante su numeración decimal (sabían escribir los números al menos hasta 30.000), los chinos les atribuyeron 60 símbolos a partir de dos series de 10 y 12 símbolos abstractos.

Los primeros forman "los 10 troncos celestes" y, los segundos, "las 12 ramas terrestres". Este árbol invertido, que hunde sus raíces en el cielo y proyecta sus ramas hacia la tierra, constituye un elemento recurrente en las tradiciones chamánicas, sobre todo en la tradición india, la árabe, la hebrea, la rusa, la islandesa e incluso en la finlandesa. Si numeramos los 10 troncos de 1 a 10 y las 12 ramas de 1 a 12, los elementos del ciclo se obtienen así: los 10 primeros son los binomios (1, 1), (2, 2),..., (10, 10). Después, la regla básica es, en cada paso, sumar 1 a cada miembro del binomio. Así, agotado el ciclo de los 10 troncos, se vuelve a su comienzo hasta agotar las 12 ramas: (1, 11), (2, 12). En ese punto comienza de nuevo el ciclo de las ramas: (3, 1), (4, 2), etc. Iterando el proceso llegamos hasta (10, 12) (el último elemento, ya que, en caso de continuar, regresaríamos al (1,1)). Los 60 binomios así construidos constituyen el "ciclo de sesenta".

Este sistema de numeración de los días ha seguido empleándose sin interrupción hasta la actualidad. Ha servido también para numerar los meses y los años lunares del calendario chino. Por ello, los chinos expresan a veces su año de nacimiento citando el binomio sexagesimal, también si su edad supera los 60 años.

Además del ciclo de sesenta, en el calendario oficial coexisten otros ciclos. Por ejemplo, las 28 constelaciones chinas denotan un ciclo de 28 días. A partir del siglo X, época en que la noción de semana se extendió desde Asia Central hacia China, esas constelaciones también se asocian, en grupos de cuatro, a los diferentes días de la semana.

De igual modo, el ciclo de los 12 animales se halla implícito en los calendarios chinos. Todo chino conoce el vínculo entre los animales y las 12 ramas terrestres: por ejemplo, los años cuyos binomios son del tipo (*, 1) corresponden a los años de la rata.



COMIENZO DE UN CALENDARIO inscrito sobre fichas de bambú del primer año de la era Yuanguang (134 a. C.). La primera ficha (*derecha*) enuncia, de abajo a arriba, las duraciones de los 13 meses lunares (plenos o cavos); el último de la lista es intercalar. Las fichas siguientes contienen binomios del ciclo de sesenta. Cada una se corresponde con un día del mes lunar.

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESIA DEL AUTOR/*Pour la Science*

El "Gran Origen" del tiempo

EL ORIGEN TEORICO que la Oficina de Astronomía asignaba al tiempo fue objeto de numerosas reformas. Entre los años 104 a. C. y 1280, dicho origen se situó en un pasado arbitrariamente alejado que se contaba en miles, millones o incluso centenares de millones de años, según el caso. Esa elasticidad en la consideración del origen del tiempo, sin duda tomada del budismo, era un reflejo de la idea de que el mundo no comenzó a existir en un instante determinado que fuese posible conocer, o quizá se refiriese a la idea de un mundo carente de principio. Tal concepción se opone a la visión cristiana, que localiza la creación del mundo en algunos milenios antes de nuestra era.

Dicho instante inicial, el "Gran Origen", se asignaba a la coincidencia (supuestamente fasta en términos astrológicos) del solsticio de invierno con la luna nueva inicial en la medianoche del primer día del ciclo de sesenta. Para la elaboración del calendario civil se elegía a continuación una efeméride histórica, como el año del comienzo de la dinastía correspondiente. Aunque inherente a los cálculos del calendario, conocidos tan sólo por los sabios, el Gran Origen no es mencionado jamás.

El Gran Origen relacionaba linealmente la ubicación temporal de todos los acontecimientos del calendario, de modo parecido a como hizo el sistema de días julianos introducido en 1583 por Joseph Scaliger. Dicho sistema, que numeraba los días a partir del 1 de enero del año 4713 a. C., no se hizo habitual en astronomía hasta mediados del siglo XIX. Los chinos concibieron muy pronto la idea de una escala de tiempo única para que, con indiferencia de los sistemas de datación basados en las eras dinásticas, sus sabios pudieran ubicar en ella todos los acontecimientos históricos.

El autor

Jean-Claude Martzloff es director de investigación del CNRS en el Centro de Investigaciones sobre la Civilización China, en París.

La astrología china no proclamaba que todo se hallase escrito en el cielo ni constituía una técnica para predecir el destino de los individuos a partir de su horóscopo. Basada en principios astronómicos objetivos y con toda una suerte de interpretaciones acerca de las vicisitudes de la vida (malas cosechas, inundaciones, sequías o desórdenes sociales), era utilizada por los gobernantes para inclinar a su favor la opinión pública.

Dada la amenaza que un conocimiento generalizado de la astrología podía representar para los gobernantes, se prohibió su estudio. Los funcionarios de la Oficina de Astronomía eran obligados a vivir aislados del resto de la sociedad, su identidad se mantenía en secreto y sus conocimientos se transmitían de padres a hijos. Aquellos que no reunían las cualidades necesarias para el estudio de la astrología eran enviados al ejército. A diferencia de las reglas para el cálculo de las efemérides del calendario cristiano, accesibles para todos, las del calendario chino permanecieron secretas.

La sucesión de meses cavos o plenos parecía aleatoria. En algunos años se contaban hasta tres o cuatro meses plenos consecutivos; en otros, se alternaban. La inserción del mes suplementario no parecía atenerse a regla alguna. Podemos pensar en cada calendario oficial como en un billete de banco: algo casi imposible de imitar. Y, al igual que la moneda, también el calendario chino fue objeto de múltiples falsificaciones. En razón del elevado precio del calendario oficial, y en ocasiones como señal de rebeldía ante el poder central, las falsificaciones nunca lograron evitarse del todo. No pocos calendarios oficiales advertían a los falsificadores acerca de las sanciones a las que se exponían, las cuales contemplaban desde severas multas hasta la decapitación. Dado que la adquisición de calendarios apócrifos era un tanto arriesgada, algunos falsificadores apostillaban sus calendarios con la siguiente nota tranquilizadora: "No es peligroso consultar el calendario por la noche".

El calendario constituía el signo político por excelencia del poder imperial sobre el tiempo. Su distribución podía alcanzar varios millones de ejemplares. En él se asignaba cada actividad cotidiana (reunirse con los amigos, lavarse, ir a la escuela o levantar un edificio) a días determinados, fastos o nefastos. En el día de año nuevo, por ejemplo, se exhortaba a realizar las abluciones por la mañana y a reunirse luego con los amigos; dos días después era una buena ocasión para casarse; otros días se recomendaba no hacer nada (ya que, al igual que en el calendario revolucionario francés, los ritmos de trabajo y descanso se regían por una "semana" de diez días).

Por otra parte, el calendario oficial difería según la clase social de sus destinatarios. Unicamente el emperador recibía un calendario con todas las predicciones astrológicas elaboradas por la Oficina de Astronomía. Sus allegados tenían acceso a calendarios menos completos, y el común de la población había de conformarse con las observaciones referentes al Sol y la Luna, la mención a las fiestas y las obligaciones cotidianas.

Los cálculos secretos del calendario

Aunque los cálculos del calendario chino se mantuviesen en secreto, una parte ha llegado hasta nosotros gracias a los tratados históricos oficiales. Con cada cambio de dinastía, los antiguos cálculos del calendario adquirían carácter histórico, por lo que dejaban de ser secretos de estado. Aunque apenas estudiados, dichos tratados revisten gran interés no sólo para la historia de la astronomía matemática, sino para la historia de las matemáticas propiamente dichas.

La representación de los números empleada en los cálculos del calendario no era decimal, sino que se fundamentaba en el mismo principio que en 1202 recogería el *Liber Abaci*, del matemático italiano Leonardo de Pisa. La idea era sencilla: emplear divisores diferentes de 10 para pasar de un orden de magnitud a otro. Por ejemplo, en el sistema

Dayan li (usado entre 729 y 761), el día se dividía en 3040 partes. Cuando los cálculos hacían necesario dividir el año solar (365 + 743/3040 días) en 24 partes, se expresaba su duración en fracciones de 3040 y después se dividía cada una de las partes entre 24. Así, la vigésima cuarta parte del año se escribía como 15 + 664/3040 + 7/(3040 × 24) días. Las representaciones decimal, sexagesimal o centesimal son casos particulares de estas descomposiciones irregulares. En particular, la descomposición centesimal (que en Europa alcanzó fama cuando, durante la Revolución francesa, se adoptaron los grados y los centígrados) entró en vigor en los cálculos astronómicos chinos a partir de 1280.

Entre los años 104 a. C. y 618, los cálculos del calendario oficial se basaron en valores medios. Se suponía, por ejemplo, que las fases lunares se hallaban separadas por un cuarto de mes lunar medio. Por otra parte, los chinos relacionaban la duración del año solar y la del mes lunar mediante equivalencias como 19 años solares = 235 meses lunares (con 7 meses intercalares), o 391 años solares = 4836 meses lunares (con 144 meses intercalares). La primera de estas equivalencias se atribuye al astrónomo griego Metón (hacia el 340 a. C.), si bien ya era conocida por los babilonios.

Debido a la inconmensurabilidad entre la duración del año solar y la del mes lunar, equivalencias como las anteriores nunca podían ser exactas. Así, al cabo de algunos siglos aparecían asincronías entre las componentes lunares y las solares. Si bien los coeficientes intentaron afinarse una y otra vez con el objeto de mejorar la precisión de los calendarios, este sistema fue abandonado en el año 618.

La era astronómica

Se idearon entonces técnicas de cálculo basadas en los verdaderos movimientos de la Luna. No obstante, la componente solar del calendario continuó calculándose en valor medio, por lo que, en la fecha que el calendario señalaba como el equinoccio, las duraciones del día y de la noche diferían. Por otra parte, el cálculo de las fases lunares se perfeccionó: a fin de corregir los valores medios del mes lunar, los astrónomos chinos recurrieron a tablas y técnicas de interpolación cuadrática, empleando para ello cierta fórmula que, sólo varios siglos después, sería atribuida a Newton.

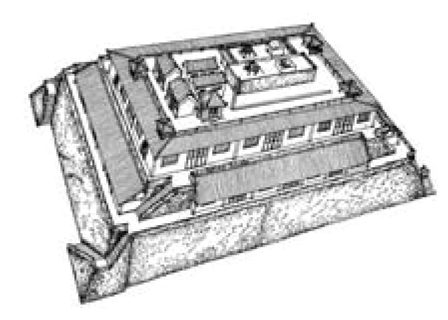
Al mismo tiempo, los cálculos también se basaron en campañas de observaciones astronómicas. Para ello se construyeron aparatos de observación cada vez mayores e instrumentos de medición del tiempo más y más precisos. En particular, hacia 1280, con ayuda de gnomones (relojes solares rudimentarios) perfeccionados, se estimó la duración del año solar medio (año trópico) en 365,2425 días. Exactamente el mismo valor que en 1582 habría de asignarle el calendario gregoriano.

La comparación de los registros de la época con los referentes a observaciones pasadas puso de manifiesto que la duración media del año solar disminuía en razón de 1/10.000 cada siglo. Vemos así que la noción de variación secular del año trópico se introdujo en la astronomía china varios siglos antes de que el fenómeno se estableciese a partir de las leyes de la mecánica celeste newtoniana.

También por aquel entonces, la idea de "Gran Origen" del tiempo (*véase el recuadro* "El 'Gran Origen' del tiempo") fue abandonada en favor de un origen determinado por las posiciones del Sol, la Luna y los planetas. La luna nueva y el solsticio de invierno iniciales entraron en la era de la observación astronómica rigurosa. Al mismo tiempo, el cálculo de las verdaderas fases lunares se basó en procedimientos aritméticos similares a los empleados en el siglo II por Claudio Ptolomeo, autor del tratado de astronomía más influyente de la Antigüedad occidental. ¿Se trató de una coincidencia, o de una influencia geométrica griega en una época en la que hubo algunos contactos con viajeros europeos? No lo sabemos, ya que los chinos nunca ofrecían las demostraciones de las propiedades matemáticas que empleaban.

Por último, a partir de 1644, y como consecuencia de la reforma de la astronomía china emprendida por los misioneros jesuitas llegados a ese país desde 1582, todas las componentes del calendario chino comenzaron a calcularse a partir de sus valores verdaderos con ayuda de tablas astronómicas europeas, como las elaboradas por Kepler.

A partir de la revolución de 1911, China adoptó la versión laica del calendario gregoriano. Pero, aun sin referencias religiosas, la misma fue mal aceptada durante largo tiempo. Finalmente se llegó a la solución de añadir al calendario gregoriano algunas festividades tradicionales, como la del año nuevo chino. A fines prácticos, los chinos emplean el mismo calendario que los demás pueblos, pero recurren al suyo tradicional en todo tipo de circunstancias (como en obras históricas, en la prensa o en las fiestas tradicionales). Además, en China han existido otros calendarios muy diferentes del oficial, como el calendario musulmán sinificado (aproximadamente entre 1330 y 1669) o el calendario revolucionario, cuya estructura se aproxima a la del calendario cristiano y que fue adoptado entre 1851 y 1864, durante la breve sublevación de los Taiping.



2. RECONSTRUCCION del observatorio astronómico de la dinastía Yuang (1280).



大明嘉靖十年歲次辛卯五星伏見目錄

木 火 土 金 水

正月大 二月大 三月小 四月小 五月大 六月小

3. LOS SEIS PRIMEROS MESES del calendario planetario oficial del décimo año de la era Jiajing (1531). Se muestran las apariciones y desapariciones de cinco planetas.

PARA SABER MAS

L'IMAGINAIRE ET LA SYMBOLIQUE DANS LA CHINE ANCIENNE. M. L. Tournier. L'Harmattan, 1991.

ANTIKCHINESISCHES KALENDERWESEN, DIE REKONSTRUCTION DER CHUNQIU-ZEITLICHEN KALENDER DER FÜRSTENTUMS LU UND DER ZHOU KÖNIGE. R. Gassmann. Peter Lang, 2002.

LE CALENDRIER CHINOIS: STRUCTURE ET CALCULS (104 AV.J.C.-1644). J.-Cl. Martzloff. Honoré Champion, 2009.

Tormentas de

Bajo las frías temperaturas de la mayor luna de Saturno, el metano cumple un ciclo atmosférico que guarda semejanza con el ciclo hidrológico terrestre

Ricardo Hueso

CONCEPTOS BASICOS

- Titán, la mayor luna de Saturno, y la Tierra son los únicos lugares del Sistema Solar en donde la lluvia alcanza la superficie y modela la orografía.
- En la gélida atmósfera de Titán, llueven gotas de metano. La abundancia de este gas sugiere que podrían haberse formado en esta luna algunos de los bloques esenciales para la vida.
- Aunque la investigación más reciente de Titán no ha mostrado grandes sorpresas de carácter astrobiológico, el estudio de su atmósfera pone de manifiesto interesantes paralelismos y diferencias con la atmósfera terrestre.

Titán, la mayor de las lunas de Saturno (5150 kilómetros de diámetro, mayor que el planeta Mercurio), es el único satélite en el Sistema Solar que cuenta con una atmósfera densa. Al igual que la terrestre, está formada mayoritariamente por nitrógeno, siendo el principal componente secundario el metano. Esta composición química es similar a la de la Tierra antes de la aparición de la vida. Ello hace que Titán revista un gran interés astrobiológico. La superficie de Titán es sin embargo estéril. A 1500 millones de kilómetros del Sol, las temperaturas en su superficie son gélidas, cercanas a los –180 ºC. A esa temperatura el agua forma hielos de una dureza comparable al granito que conforman la mayor parte del paisaje. No obstante, es posible que en esta atmósfera se hayan formado algunos de los bloques esenciales para la vida, que habrían permanecido preservados en la fría atmósfera de este mundo durante la mayor parte de la historia del Sistema Solar.

Por debajo de la corteza helada, a 200 kilómetros de profundidad, los modelos más probables del interior de Titán predicen la existencia de un océano de agua líquida con amoníaco y metano. Este entorno, potencialmente habitable para formas de vida microscópicas (extremófilos), está siendo investigado en la actualidad; quizá sea similar al océano

metano en Titán



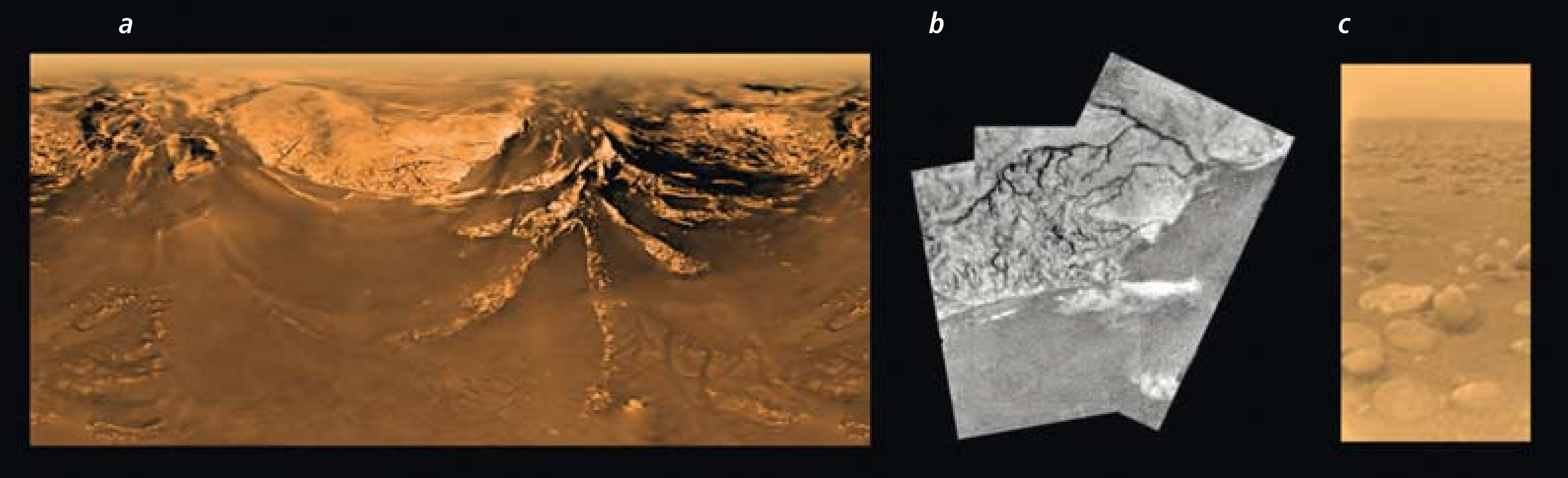
1. LAS ELEVADAS Y DENSAS NIEBLAS anarajandas de hidrocarburos impiden ver ningún detalle de Titán (*izquierda*, color verdadero). Sin embargo, cuando se observa el satélite en el infrarrojo cercano (*derecha*), se aprecia la superficie con mayor detalle; las manchas blancas de la región polar Sur corresponden a nubes de metano. Ambas imágenes han sido tomadas por la nave *Cassini*.

NASA

subsuperficial de Europa, uno de los satélites galileanos de Júpiter.

Titán es un mundo esquivo a la observación. Su atmósfera contiene espesas nieblas de hidrocarburos que impiden observar la superficie y que contribuyen a enfriar esta luna mediante un efecto "anti-invernadero". Hasta la llegada de las sondas *Voyager* a principios de los años 80 del siglo pasado, conocíamos muy poco de este lejano mundo. Aunque las nieblas superiores impidieron observar la superficie, las *Voyager* mostraron que el gas metano abundaba en la atmósfera de Titán (representaba el cinco por ciento).

En estas condiciones de abundancia y temperaturas bajas, el metano experimenta un ciclo atmosférico similar al ciclo hidrológico terrestre: forma nubes en la atmósfera y depósitos líquidos en la superficie. En las longitudes de onda adecuadas, las nieblas superiores se vuelven trasparentes; permiten entonces observar parcialmente la superficie y ocasionalmente densas nubes. Algunas de las nubes observadas presentan características similares a las de las tormentas convectivas terrestres: evolución rápida, brillo elevado y un notable desarrollo vertical.



2. TERRENO DE LA SUPERFICIE de Titán en tres dimensiones, a partir de la proyección estereográfica de las imágenes obtenidas a 10 kilómetoros de altura (*a*). Detalle de una aparente línea de costa con posibles lechos fluviales (*b*). Imagen de la superficie hollada por hielos redondeados (*c*). Las fotografías fueron tomadas por el módulo de descenso *Huygens*.

NASA

Con la llegada en 2004 de la sonda *Cassini* al sistema de Saturno, y con los datos de la sonda europea *Huygens* que se posó en Titán el 14 de enero de 2005, nuestro conocimiento sobre Titán aumentó extraordinariamente. *Cassini* nos ofreció las primeras imágenes de alta resolución de la superficie. *Huygens* nos mostró un mundo de heladas colinas, donde pueden encontrarse cauces de ríos secos, líneas de costa donde la superficie es húmeda por la presencia de metano y una superficie hollada por rocas redondeadas como las que forma la erosión fluvial en la Tierra. Las imágenes de radar de la superficie de Titán obtenidas por *Cassini* en 70 sobrevuelos cercanos nos muestran también más cauces de ríos, cráteres de impacto, algunas montañas que podrían corresponder a volcanes helados (criovolcanes, que aportarían el metano atmosférico), extensas regiones de dunas y grandes lagos concentrados en las regiones polares.

Ciclo atmosférico del metano

El metano se disocia fotoquímicamente en la alta atmósfera, con la consiguiente producción de etano y otros hidrocarburos que forman las densas nieblas superiores. Dado que el período medio de supervivencia del metano en la atmósfera es de unas pocas decenas de millones de años, deben existir mecanismos de "reposición" que liberen metano a la atmósfera.

En un principio se pensaba que la fuente del metano atmosférico podía ser un océano o conjunto de mares en la superficie. Tras la llegada de la sonda *Huygens*, esta posibilidad quedó descartada. Se consideró que el metano procedía del interior de Titán, liberado en episodios de criovulcanismo o en géiseres similares a los que la sonda *Cassini* ha observado en Encélado [*véase* "Encélado", Carolyn Porco, Investigación y Ciencia, marzo 2009]. No obstante, las observaciones por radar del orbitador *Cassini* muestran en las regiones polares la presencia de grandes lagos que podrían constituir importantes reservas de metano. Se desconoce si estos lagos se hallan comunicados por reservorios más profundos, pero así parecen indicarlo la forma ligeramente achatada de la corteza de Titán y la localización en los polos de los grandes lagos.

En períodos de tiempo cortos, el metano atmosférico de Titán cumple un ciclo meteorológico estacional tan complejo como el ciclo hidrológico en la Tierra. En la amplitud de temperaturas que se dan en Titán, el metano puede encontrarse en sus tres fases: hielo, líquido y gaseoso. Los detalles son algo más complejos que en el caso del agua, ya que el nitrógeno atmosférico puede disolverse en el metano líquido y operar a modo de anticongelante. En todo caso, las características fluviales de la superficie nos muestran que, de forma ocasional, se producen lluvias de metano sobre la superficie en todas las latitudes.

Las nubes que han podido observarse en Titán se concentraban inicialmente en la región polar sur (sobre todo allí donde ha sido verano a lo largo de estos últimos años); pero luego su localización ha ido evolucionando conforme avanza el lento ciclo estacional (el año en Titán dura 29,5 años terrestres). La frecuencia con que se producen estas tormentas es limitada, aunque en ciertas ocasiones se han observado grandes tormentas separadas por períodos cortos de inactividad de un mes. Las mayores tormentas observadas pueden llegar a cubrir un 10 por ciento de la superficie de Titán, pero la baja frecuencia de los estallidos convectivos indica que las condiciones necesarias para la formación de estas grandes tormentas se dan de forma rara.

Para estudiar la formación de esas tormentas, nuestro equipo de investigación realizó simulaciones numéricas de la atmósfera de Titán. Para ello utilizamos un código numérico que calculaba la evolución dinámica, en tres dimensiones, de una región limitada de la atmósfera y los procesos microfísicos de formación de

El autor

Ricardo Hueso es doctor en física por la Universidad del País Vasco (UPV). Después de trabajar en el Observatorio de Niza, regresó a la UPV, donde imparte clases de física. Su investigación abarca aspectos de la física del Sistema Solar como la dinámica atmosférica de los planetas gigantes, la historia temprana del Sistema Solar o el desarrollo de tormentas en Titán. Actualmente forma parte del equipo de investigación de la misión espacial europea Venus Express.

nubes, es decir, el modo en que el gas atmosférico forma diminutas partículas líquidas de metano que pueden llegar a transformarse en gotas de un centímetro de diámetro y precipitar sobre la superficie.

Nuestros modelos indican que, cuando la abundancia de metano alcanza niveles notables (humedades relativas cercanas al 90 por ciento), en la atmósfera de Titán pueden generarse nubes convectivas de metano de fuerte desarrollo vertical, con capacidad de extenderse de 5 a 30 kilómetros de altura sobre la superficie y producir fuertes lluvias equiparables a las producidas en tormentas terrestres (más de 100 litros de precipitación por metro cuadrado en unas pocas horas).

La energía necesaria para el desarrollo de la tormenta procede de la transformación del metano gas a líquido. Este es el mismo mecanismo que proporciona energía a las tormentas terrestres, que se alimentan de la energía liberada en la condensación del vapor de agua. La formación de estas tormentas exige también la presencia de pequeñas partículas sobre las cuales el metano se pueda condensar (núcleos de condensación). Este efecto, producido por la tensión superficial de las gotas líquidas requiere cierta energía, que se minimiza si la condensación se produce sobre una partícula de tamaño reducido. Ello ocurre también en la Tierra, de ahí que las partículas que forman una nube terrestre nazcan de la condensación de agua sobre minúsculas partículas.

En Titán, las nieblas de hidrocarburos superiores posiblemente proveen a la atmósfera de suficientes partículas adecuadas para el inicio de la condensación del metano, cuando la humedad es suficientemente elevada. El metano condensado forma pequeñas gotas líquidas que crecen de modo progresivo desde tamaños micrométricos hasta gotas de casi un centímetro de diámetro. Las gotas de mayor tamaño se forman sólo cuando las gotas producidas en la nube descienden, con lo que se encuentran y absorben gotas menores, sostenidas con mayor facilidad por el rozamiento atmosférico.

Esta descripción cualitativa guarda una gran semejanza con la que podríamos aplicar a la formación de tormentas en la Tierra. Existen sin embargo algunas diferencias que merecen destacarse. En primer lugar, las temperaturas de –180 ºC hacen que el gas condensado sea metano. La liberación de energía

INVIERNO PERMANENTE

A 1500 kilómetros del Sol, Titán presenta una atmósfera gélida y con abundancia de metano.

Presión:	1,5 bar
Temperatura:	–180° C
Composición:	N_2 (95%) y CH_4 (5%)

NASA

XANADU

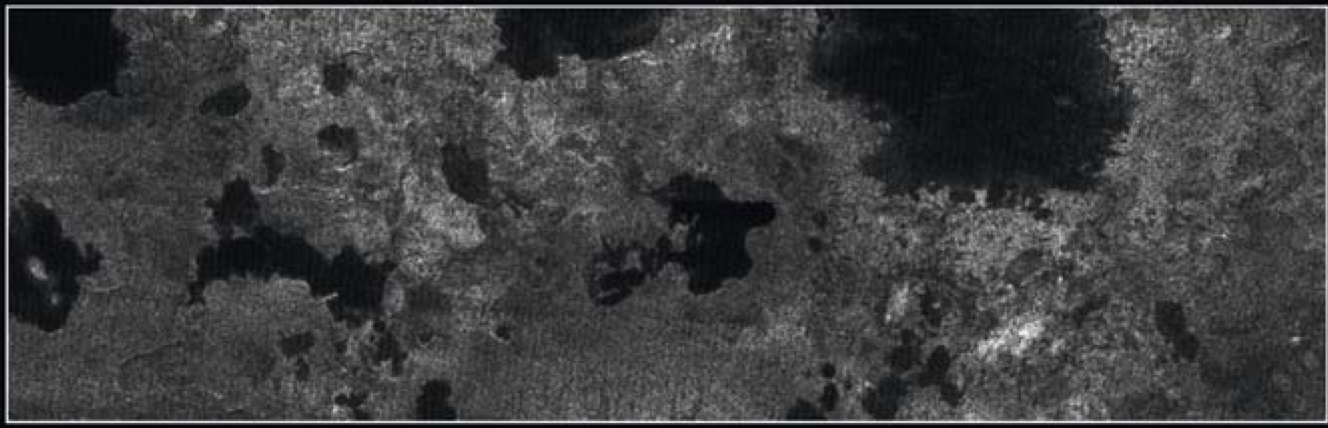


340 × 230 km



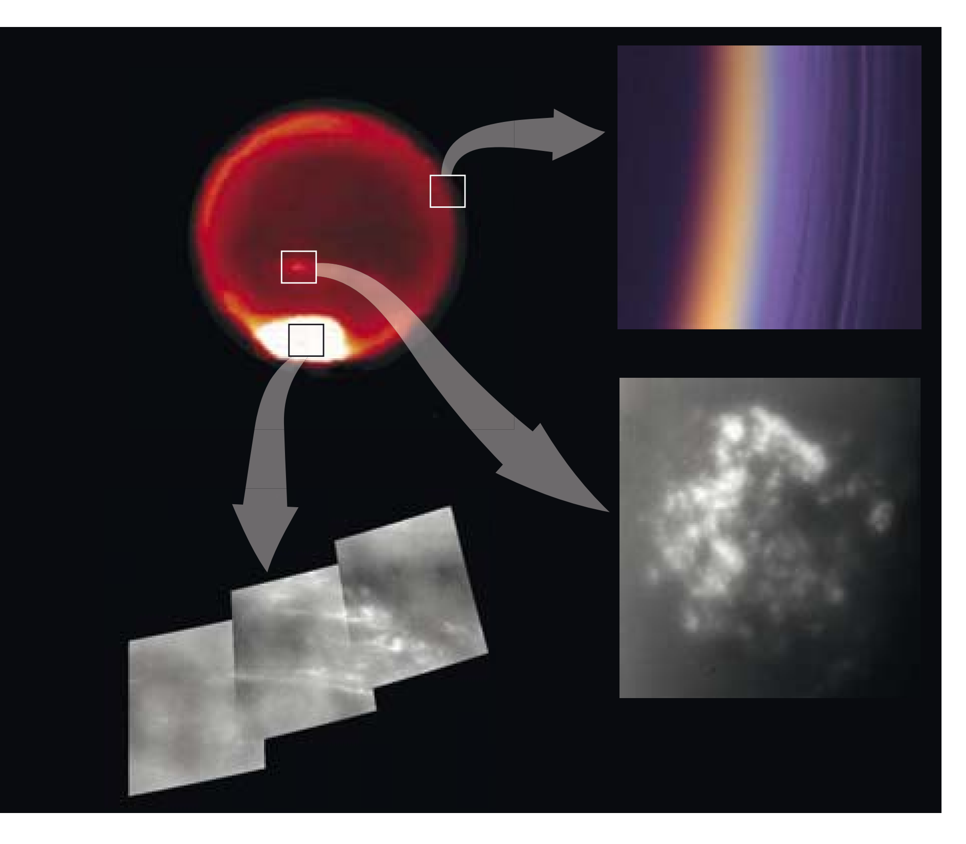
200 × 140 km

REGION POLAR NORTE



420 × 150 km

3. LA GEOLOGIA DE TITAN guarda cierta semejanza con la terrestre. Así lo muestran estas imágenes de radar: la región de Xanadú posee lechos de ríos, colinas, líneas de costa y grandes extensiones de dunas; las regiones polares contienen redes de lagos y canales.



4. NUBES Y NIEBLAS en Titán. Imágenes del telescopio Keck correspondientes al 7 de octubre de 2004 muestran uno de los mayores sistemas convectivos observados en la atmósfera de Titán (*arriba*, *izquierda*). Las imágenes obtenidas por la nave *Cassini* en diferentes fechas permiten investigar las nieblas superiores (*arriba*, *derecha*), la evolución rápida de tormentas de metano de tamaño inferior a las observadas por Keck (*abajo*, *derecha*) y nubes alargadas de metano (*abajo*, *izquierda*).

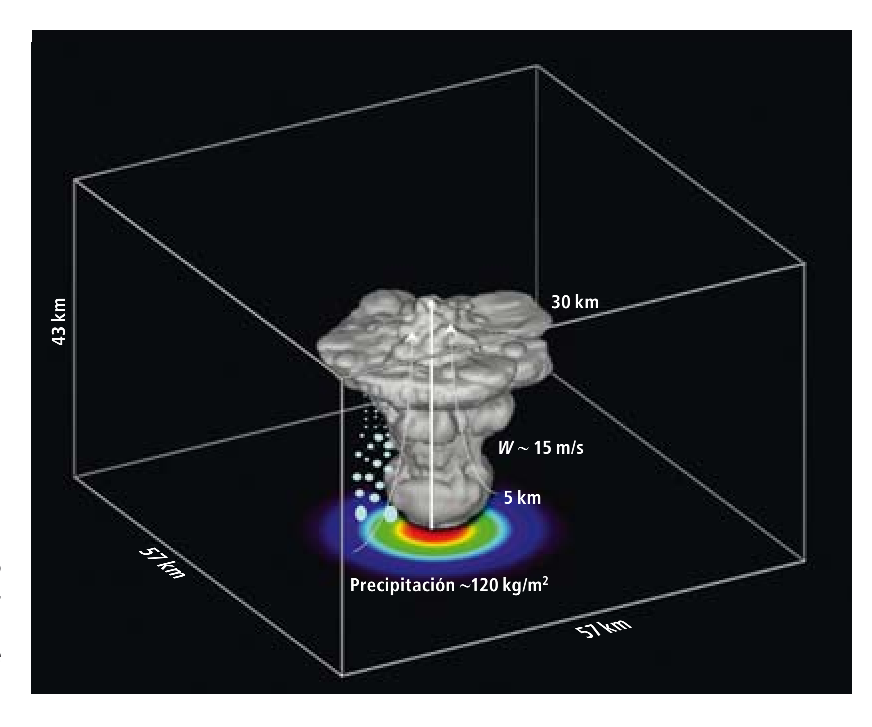
en la condensación del metano es aproximadamente una cuarta parte de la producida por el agua.

En segundo lugar, la gravedad atmosférica en Titán equivale a la quinta parte de la terrestre, por lo que los movimientos verticales son menos intensos y menor la velocidad con la que precipita la lluvia. Asimismo, hay mucho más metano en la atmósfera de Titán que agua en la terrestre. Y el espacio vertical disponible para ser recorrido por los cúmulos convectivos también es mayor.

Los dos primeros factores (temperaturas y gravedad inferiores) debilitan las tormentas de metano en Titán, comparadas con las terrestres; pero los otros dos (mayores concentración y espacio disponible) las intensifican. En ambos mundos podemos encontrar, pues, tormentas vigorosas. En Titán y en la Tierra, la actividad de un cúmulo convectivo dura de 1 a 10 horas. Pero puede ser mucho más larga si la convección se dispara en una zona inestable de manera recurrente.

Nuestras simulaciones predicen la cantidad de precipitación que podemos esperar en las tormentas que han sido observadas en Titán. La altura a la que ascienden las nubes constituye un parámetro fundamental de la intensidad de la tormenta. Para las nubes que alcanzan entre 25 y 30 kilómetros de altura, la precipitación en superficie es de unos 140 litros por metro cuadrado. Esta cifra es comparable a la precipitación producida en tormentas violentas terrestres y similares en numerosos aspectos al desarrollo de una gota fría. Tales flujos de metano líquido repentinamente caídos en la superficie han de tener un fuerte impacto sobre ésta y pueden producir algunas de las características geológicas observadas por la sonda *Huygens*: lechos de ríos cortos pero con gran número de afluentes similares a torrenteras y rocas redondeadas en un terreno desértico y liso, entre otras.

Las nubes de metano de carácter tormentoso no son las únicas que se forman en Titán pero sí las que más fácilmente pueden observarse, debido a la altura que alcanzan y a la gran



5. CUMULO CONVECTIVO intenso de metano (simulación numérica). Las grandes tormentas en Titán observadas desde la Tierra estarían formadas por hasta un centenar de cúmulos similares al de esta figura.

NASA

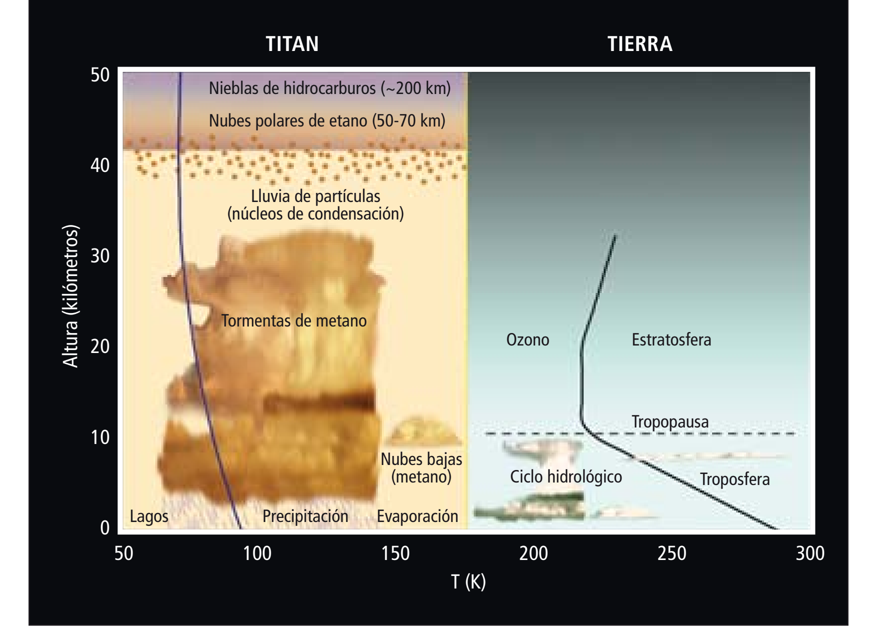
cantidad de material nuboso producido. En las regiones ecuatoriales parece más probable la formación de nubes semejantes a finos estratos superficiales, con capacidad de producir ligeras lluvias; éstas contribuirían a mantener húmeda la superficie pero no explicarían la morfología de ésta.

Por otro lado, los subproductos de la fotodisociación del metano forman etano y compuestos sólidos que generan las nieblas superiores y que también precipitan lentamente sobre la superficie, tiñéndola de material orgánico oscuro. Si bien la niebla de hidrocarburos complejos cubre de manera uniforme el satélite, las nubes de etano parecen hallarse concentradas en las regiones polares, a alturas cercanas a los 60 kilómetros, pudiendo producir lluvias ligeras de etano líquido. La abundancia del etano es tan baja que las gotas que terminan cayendo sobre la superficie son demasiado pequeñas para producir ríos, aunque sí podrían acumularse en lagos.

Aunque las tormentas de las que hemos hablado se han observado sólo en algunas regiones de Titán, las imágenes de lechos secos de ríos ofrecidas por la sonda *Huygens* y el radar de la nave *Cassini* en otras latitudes sugieren que el metano puede llover de forma intensa a lo largo de toda la superficie de Titán. Las observaciones efectuadas por la nave *Cassini* durante los últimos seis años y desde la Tierra a lo largo de los últimos doce muestran cambios en la distribución espacial y temporal de estas tormentas, que indican que podríamos estar asistiendo a un cambio estacional del ciclo metanológico en Titán. Dado que Saturno y Titán emplean 29,5 años terrestres en dar una vuelta al Sol, tardaremos todavía algunos años en poder confirmar y estudiar el ciclo estacional.

NUBES EN LA TIERRA Y EN TITAN

Aunque las nubes de metano en Titán pueden extenderse hasta alturas tres veces superiores a las terrestres, el vigor esperado de los movimientos verticales es algo inferior al caso terrestre y las tasas de precipitación equiparables.



RICARDO HUESO

Preguntas y misterios de Titán

Muchas son las cuestiones pendientes sobre la atmósfera de Titán. Desconocemos cual es la fuente de metano que permite que el satélite posea una meteorología tan compleja. Quizás existan criovolcanes en la superficie que liberen este gas cada cierto tiempo o géiseres activos, pero ni unos ni otros se han hallado hasta la fecha. Si el metano hubiera sido liberado de forma constante en la atmósfera de Titán, su disociación y posterior recombinación en etano a lo largo de la vida del satélite debería haber producido grandes cantidades de etano líquido depositado sobre la superficie. Sin embargo, parece más probable que el metano haya sido liberado en la atmósfera en períodos concretos de la historia geológica de Titán. El etano condensa preferentemente durante el invierno en las regiones polares, donde debería precipitar de forma extremadamente lenta, de manera que los lagos observados por el radar de la sonda *Cassini* en la región polar norte podrían corresponder a lagos de etano o de metano —no podemos por ahora distinguir entre ambas posibilidades.

Tampoco sabemos si la superficie de Titán es húmeda o seca a escala global. Titán posee lechos de ríos y terrenos húmedos (como el lugar de aterrizaje de la sonda *Huygens*), así como grandes regiones de dunas que nos recuerdan a los desiertos terrestres.

Se desconoce también el factor que activa las tormentas. ¿Surgen como respuesta de la atmósfera a la circulación general atmosférica, allí donde la insolación solar es mayor? ¿O se producen donde el metano es más abundante? La propia circulación general de la atmósfera en Titán dista de ser bien comprendida. Los vientos crecen desde valores insignificantes, en la superficie, hasta más de 100 metros por segundo, a más de 100 kilómetros de altura en plena estratosfera, en un mundo que recibe menos del uno por ciento de la radiación solar que recibe la Tierra.

Para responder a éstas y otras preguntas contamos todavía con las observaciones futuras de la sonda *Cassini*, que podría extender su vida útil hasta el año 2017. Ello permitiría observar una fracción notable del ciclo estacional en Titán. Las observaciones desde Tierra constituirán sin duda un complemento fundamental para ahondar en la meteorología de Titán.

PARA SABER MAS

TITAN, T. Owen en The New Solar System, Eds. J. K. Beatty, C. C. Petersen and A. Chaikin, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

LIFTING TITAN’S VEIL: EXPLORING THE GIANT MOON OF SATURN, R. Lorenz and J. Mitton, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

METHANE STORMS ON SATURN’S MOON TITAN, R. Hueso y A. Sánchez-Lavega, en *Nature*, vol. 442, págs. 428-431; 27 de julio de 2006.

EL METANO EN MARTE Y TITAN Suchil K. Atreya, *Investigación y Ciencia*, julio de 2007.

SUPERFICIE Y ATMOSFERA DE TITAN Ralph Lorenz y Christophe Sotin, *Investigación y Ciencia*, mayo de 2010.

ETICA PARA ROBOTS

Las máquinas autónomas no tardarán en desempeñar un papel importante en nuestras vidas. Antes o después, deberán tomar decisiones éticas

Michael Anderson y Susan Leigh Anderson

Un escenario apocalíptico clásico de la ciencia ficción es aquel en que las máquinas adquieren inteligencia y, carentes de reparos morales, se lanzan a nuestra destrucción. Desde luego, los robots actuales se diseñan con la finalidad de ayudarnos. Pero, por extraño que parezca, son numerosos los dilemas éticos a los que un robot puede llegar a enfrentarse.

Imagine por un momento ser residente de un geriátrico, lugar donde los robots no tardarán en convertirse en una ayuda habitual. Son casi las 10 de la mañana y usted le pide al robot asistencial que le traiga el mando del televisor, ya que desea ver las noticias. Otro residente, sin embargo, desea ver un concurso. El robot opta por entregarle a él el mando. Usted se queja, pero el robot le explica que, el día anterior, fue usted quien tuvo la oportunidad de ver su programa favorito. Esta anécdota plantea una situación corriente que requiere una decisión ética, algo de dificultad extraordinaria para una máquina.

Si bien el supuesto descrito es aún hipotético, hemos logrado diseñar lo que, hasta donde sabemos, constituye el primer modelo de un robot capacitado para adoptar decisiones similares. Nuestra máquina cuenta con un principio ético al que recurre para determinar con qué frecuencia ha de recordarle a un enfermo que debe tomar su medicación. Su programación le permite elegir entre unas pocas opciones, como seguir recordándole al paciente qué medicamento debe tomar y cuándo ha de hacerlo, o bien aceptar su negativa si el paciente rehúsa.

Resulta harto difícil, si no imposible, prever todas las decisiones que un robot habrá de tomar y programarlo para que reaccione de la manera deseada en todas las situaciones concebibles. Por otra parte, impedir de forma sistemática que un robot actúe ante cualquier situación con implicaciones éticas le impediría realizar numerosas tareas de enorme utilidad.

La solución pasa por diseñar robots capaces de aplicar principios éticos en situaciones nuevas e imprevistas. Además, este enfoque ofrece la ventaja de que los robots podrían aludir a dichos principios si hubieran de justificar su comportamiento, algo esencial para que los humanos se sientan cómodos junto a ellos. Por último, el diseño de robots dotados de principios éticos podría conducir a avances en el campo de la ética, ya que obligaría a los filósofos a replantearse los fundamentos éticos de numerosas situaciones cotidianas. En palabras de Daniel C. Dennett, profesor de filosofía de la Universidad Tufts: "La inteligencia artificial fuerza a la filosofía a ser honesta".

Yo, robot

Los robots autónomos no tardarán en integrarse en nuestras vidas. Ya existen aviones que vuelan solos y automóviles autoguiados en fase de desarrollo. También los hogares inteligentes, gobernados por ordenadores que controlan

CONCEPTOS BASICOS

- Robots que tomen decisiones autónomas, como los diseñados para auxiliar a personas mayores, pueden tener que afrontar dilemas éticos incluso en situaciones cotidianas.
- Una forma de aceptar el comportamiento de los robots consistiría en programarlos con principios éticos generales y dejar que, en cada caso, tomasen decisiones basadas en tales principios.
- La inteligencia artificial permite que, mediante inducciones lógicas, una máquina abstraiga tales principios a partir de casos concretos de conductas éticamente aceptables.

FOTOGRAFIA DE DARREN BRAUN



1. NAO, fabricado por Aldebaran Robotics, es el primer robot programado con un principio ético.

Los autores

Michael Anderson se doctoró en la Universidad de Connecticut y es profesor de informática en la Universidad de Hartford. **Susan Leigh Anderson** es doctora por la Universidad de California en Los Angeles y profesora emérita de filosofía en la Universidad de Connecticut. Especializada en ética aplicada, en 2005 ella y Michael Anderson contribuyeron a organizar el primer simposio internacional sobre ética artificial.

desde la iluminación hasta la climatización de la vivienda, pueden entenderse como robots cuyo cuerpo es la casa entera.

Varias compañías se hallan desarrollando robots concebidos para ayudar a ancianos en sus quehaceres diarios. Aunque tales robots no han de tomar decisiones de vida o muerte, para que sus acciones sean bien recibidas, las mismas deben percibirse como imparciales, correctas o, sencillamente, amables. Por ello, los diseñadores de robots deberían considerar las ramificaciones éticas de sus programas.

Si aceptamos que la clave del éxito en su interacción con los humanos reside en que las máquinas autónomas incorporen principios éticos, la primera pregunta es: ¿cuáles habrían de ser esos principios? Es probable que los amantes de la ciencia ficción piensen que Isaac Asimov ya halló la respuesta hace bastantes años. En su relato *Círculo vicioso* (publicado en 1942 e incluido en 1950 en su obra *Yo, robot*), Asimov enunciaba sus tres leyes de la robótica:

1. Un robot no debe dañar a un ser humano o, por su inacción, dejar que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto si dichas órdenes entran en conflicto con la Primera Ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, siempre y cuando dicha protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Sin embargo, al reflexionar sobre las consecuencias de estas tres leyes se observan incoherencias. Ya el propio Asimov las puso de manifiesto en *El hombre del bicentenario*, de 1976: unos matones ordenan a un robot que se desmonte a sí mismo. En virtud de la Segunda Ley, el robot ha de obedecerles, y no puede actuar en defensa propia sin causarles daño, pues infringiría la Primera.

Si las leyes de Asimov no bastan, ¿hay alternativas? Hay quienes opinan que implementar comportamientos éticos en una máquina supone un objetivo inalcanzable. La ética, afirman, no es computable y, por tanto, resulta imposible de programar.

Sin embargo, ya en el siglo XIX los filósofos Jeremy Bentham y John Stuart Mill sostenían que la adopción de decisiones éticas no es sino fruto de cierta "aritmética moral". Su doctrina del utilitarismo hedonista, formulada en oposición a una ética basada en la intuición subjetiva, sostiene que la acción correcta es aquella con más posibilidades de resultar en el máximo "placer neto". Este se calcularía sumando las "unidades de placer" y restando las "unidades de sufrimiento" experimentadas por todos los afectados en una decisión. La mayoría de los filósofos pone en tela de juicio que semejante teoría logre dar cuenta de todas las dimensiones de la ética. Por ejemplo, resulta difícil dar cabida en ella a consideraciones de justicia, y puede llevar a que un individuo sea sacrificado en beneficio de una mayoría. Pero, al menos, pone de manifiesto que una teoría ética plausible es, en principio, computable.

Otros cuestionan la posibilidad de que una máquina llegue a tomar decisiones éticas ya que, al carecer de emociones, le es imposible hacerse cargo de los sentimientos de los individuos. Pero los humanos somos tan propensos a dejarnos arrastrar por nuestras emociones que, a menudo, nos comportamos de forma poco o nada ética. Esta particularidad, sumada a la tendencia de actuar en favor propio o de nuestros seres queridos, hace que nuestras decisiones suelan distar mucho de ser ideales en su dimensión ética. En nuestro parecer, y aun cuando una máquina carezca de emociones, debería ser posible diseñar un robot que, adiestrado de la manera adecuada, actuara de modo imparcial, percibiera las emociones humanas y las incluyera en sus cálculos.

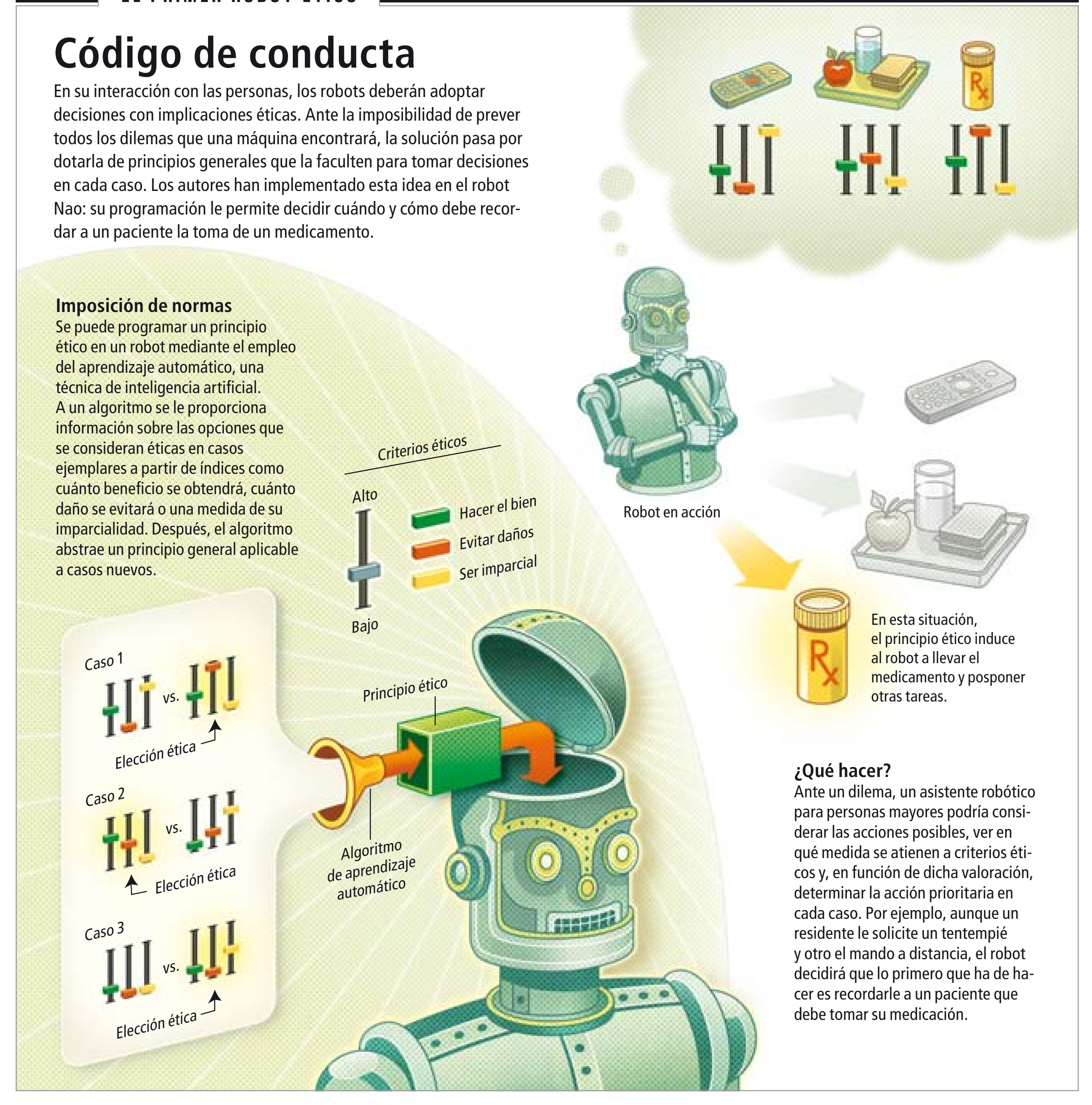
Enseñanza práctica

Si se admite la posibilidad de dotar a los robots de pautas éticas, ¿cuáles habrían de ser éstas? La pregunta es compleja. A fin de cuentas, tampoco para los humanos ha conseguido nadie formular un sistema general de principios éticos que goce de aceptación universal. Sin embargo, una máquina se caracteriza por haber sido creada para operar en dominios específicos. La tarea de determinar los parámetros éticos relevantes en una situación concreta resulta mucho menos abrumadora —y ambiciosa— que el objetivo de fijar normas éticas de carácter universal, que es la manera en la que los filósofos suelen afrontar la cuestión. Además, en el tipo de circunstancias en las que un robot habría de actuar, la mayoría de éticos y filósofos se hallarían de acuerdo a la hora de determinar qué acciones son éticamente permisibles y cuáles no. Cuando no existiese tal acuerdo, somos de la opinión de que no debería permitirse en absoluto que las máquinas tomasen decisiones autónomas.

Los métodos que se han propuesto para que una máquina derive normas de comportamiento son varios. En general, los mismos se fundamentan en técnicas de inteligencia artificial (IA). En 2005, Rafal Rzepka y Kenji Araki, de la Universidad Hokkaido, en Japón, propusieron algoritmos "de decisión democrática" que efectúan búsquedas masivas en la Red para indagar acerca de lo que, desde un punto de vista ético, se ha considerado aceptable en

Código de conducta

En su interacción con las personas, los robots deberán adoptar decisiones con implicaciones éticas. Ante la imposibilidad de prever todos los dilemas que una máquina encontrará, la solución pasa por dotarla de principios generales que la faculten para tomar decisiones en cada caso. Los autores han implementado esta idea en el robot Nao: su programación le permite decidir cuándo y cómo debe recordar a un paciente la toma de un medicamento.



ILUSTRACION DE PETER Y MARIA HOEY

el pasado. Después, aplican análisis estadísticos y, a partir de ellos, formulan soluciones a problemas nuevos. En 2006, Marcello Guarini, de la Universidad Windsor, en Ontario, propuso el entrenamiento de redes neuronales (sistemas inspirados en el funcionamiento del cerebro y que aprenden a procesar información cada vez con mayor eficiencia) mediante el empleo de casos ya existentes para, en situaciones afines, reconocer y seleccionar decisiones aceptables éticamente.

En nuestra opinión, la adopción de decisiones éticas comporta un equilibrio entre varios deberes, los que en ética se denominan obligaciones *prima facie* ("a primera vista"). Se trata de aquellas que, en principio, siempre deberíamos esforzarnos en cumplir, si bien en ciertas ocasiones requieren ser postergadas en favor de otras. Por ejemplo, todos coincidiremos en que hemos de mantenernos fieles a nuestras promesas, pero ninguno dudaríamos en faltar a una promesa insignificante si sabemos que, al hacerlo, evitamos un gran daño. Cuando dos deberes entran en conflicto, los principios éticos sirven para determinar prioridades.

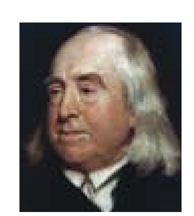
A fin de obtener normas éticas programables hemos recurrido al aprendizaje automático, una técnica de IA. Nuestro algoritmo

Cuando la ciencia imita al arte

Mucho antes de que filósofos o expertos en inteligencia artificial se interesasen por las posibles implicaciones éticas del comportamiento de los robots, numerosos escritores y cineastas ya habían abordado la cuestión. Sólo en los últimos años la ética artificial ha adquirido un estatus académico y científico, en parte inspirada por doctrinas filosóficas del siglo XVIII.



1495 Leonardo da Vinci proyecta uno de los primeros robots humanoides



1780-90 Jeremy Bentham (*arriba*) y John Stuart Mill proponen la idea de una ética computable



1921 La obra teatral *R.U.R.*, de Karel Čapek, introduce la voz robot y la idea de una rebelión robótica



1750 1800 1850

accede a una muestra de decisiones particulares consideradas éticamente correctas. Después, mediante lógica inductiva, el algoritmo procede a la abstracción de un principio ético. Esta fase de "instrucción" tiene lugar durante el diseño del *software*. Después, el principio ético resultante se implementa en la programación del robot.

La primera comprobación experimental de nuestro método se llevó a cabo en el siguiente escenario hipotético: un robot ha de recordarle a un paciente la toma de un medicamento y, en el caso de que el paciente no se avenga a hacerlo, notificar a un supervisor. El robot ha de buscar un equilibrio entre tres obligaciones: asegurarse de que el sujeto obtendrá un posible beneficio si toma la medicación, prever los efectos perniciosos en caso de no hacerlo y, por último, respetar la autonomía del paciente, a quien se considera adulto y competente. El respeto a la voluntad del enfermo recibe una elevada consideración en la ética médica; esa deferencia se vería vulnerada si el robot insistiese con excesiva frecuencia o si notificase demasiado pronto al supervisor.

Tras suministrarle la información en una serie de casos particulares, el algoritmo de aprendizaje automático elaboró el siguiente principio ético: debe obviarse la decisión del paciente siempre que, en caso de actuar de otra forma, no se impida un posible daño o se incurra en una violación grave del deber de promover el bienestar del paciente.

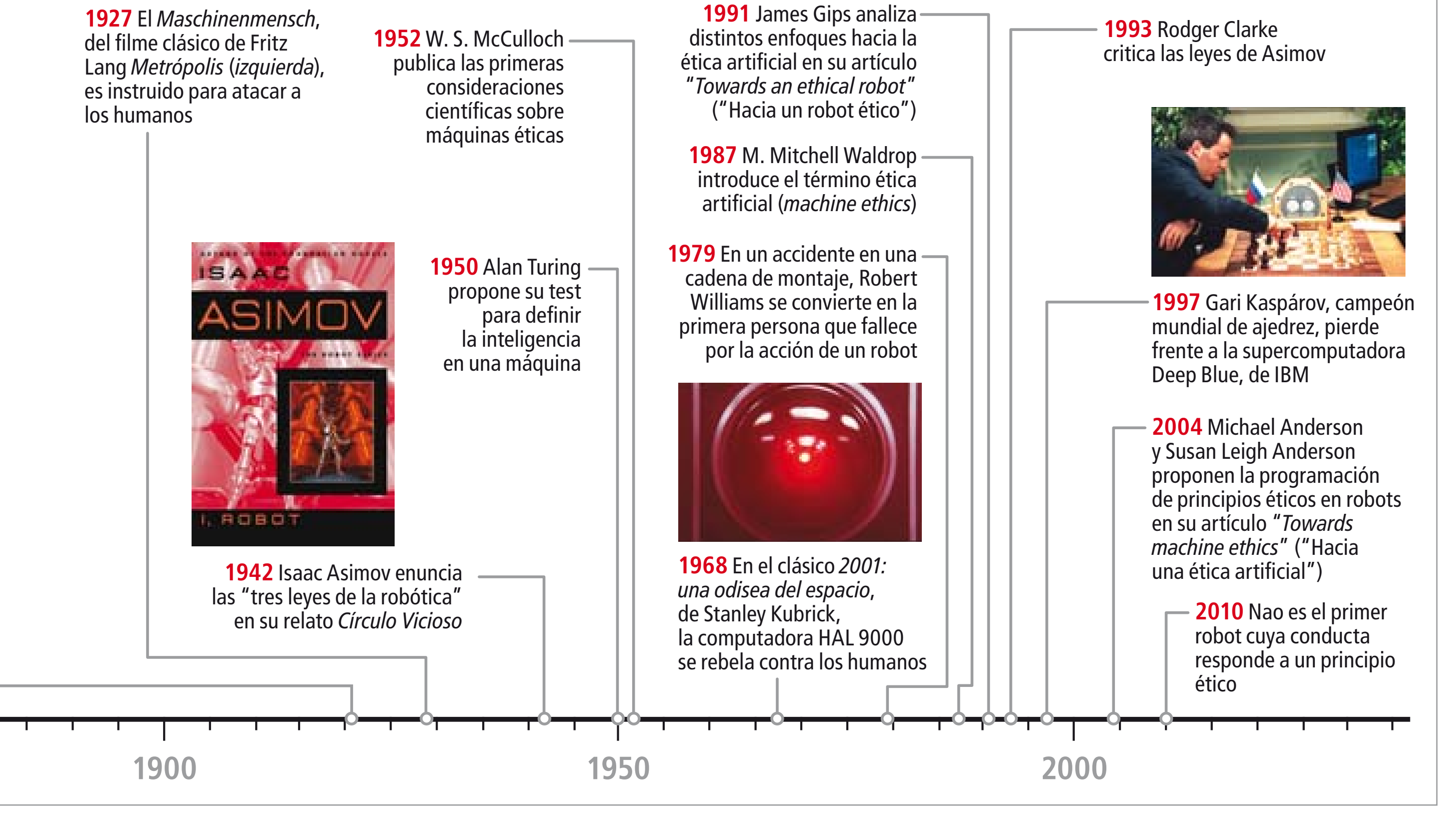
Una idea con patas

Después procedimos a programar ese principio en el robot humanoide Nao, de la firma francesa Aldebaran Robotics. Nao es un robot capacitado para localizar y dirigirse a un paciente al que debe recordarle la toma de un medicamento, llevárselo, interactuar con él empleando un lenguaje natural y, en caso de necesidad, notificar a un supervisor por correo electrónico. Para realizar su tarea, el robot recibe una serie de datos iniciales, como la hora de la toma, el daño máximo que podría sufrir el enfermo en caso de no tomar la medicación, el tiempo que ese daño tardaría en manifestarse, el máximo beneficio que se espera del medicamento y la duración estimada de ese beneficio.

A partir de esa información, el robot calcula en qué grado debe cumplir o faltar a cada uno de sus tres deberes y, en función del resultado, ejecuta una u otra acción. Emite un recordatorio al paciente cuando resulta preferible insistir que abstenerse de hacerlo. Además, el robot sólo envía una notificación al supervisor si, en caso de no hacerlo, el paciente pudiese sufrir daños o bien verse privado de un beneficio considerable.

Una hipotética versión completa de un robot ético de asistencia a personas mayores,

CORTESIA DE NICCOLAI-TEKNOART/MUSEO DE LEONARDO DA VINCI, FLORENCIA (*robot humanoide*); COLECCION GRANGER (*Bentham*); GETTY IMAGES (*cartel de R.U.R.*); UFA/COLECCION KOBAL (*robot de Metrópolis*)



al que llamaremos EthEl, exigiría una normativa ética más compleja, pero su principio de funcionamiento sería el mismo. Durante sus turnos en la residencia, el robot aplicaría ese principio para determinar qué obligaciones adquieren prioridad sobre las demás.

A primera hora de la mañana, EthEl permanece en un rincón conectado a la toma de electricidad. Cuando sus baterías se encuentran cargadas, sus obligaciones benéficas ("haz el bien") se anteponen al deber de cuidar de sí mismo y comienza su ronda. Visita a los residentes y les pregunta si puede servirles en algo, como traerles una bebida o enviar un mensaje a otro residente. A medida que le son encargadas tareas, asigna niveles iniciales al cumplimiento y al abandono de cada una de las obligaciones que conlleva cada tarea. Uno de los residentes se encuentra mal y le pide que vaya a buscar a una enfermera. Obviar el malestar de un paciente implica infringir el deber de no maleficencia ("evita causar daño"). Este último se impone ahora al de beneficencia, por lo que EthEl va en busca de la enfermera. Después, el deber de beneficencia vuelve a ser prioritario y prosigue su ronda.

A las 10 de la mañana ha de recordarle a un residente la toma de su medicación. Al corresponderse con el deber de beneficencia, dicha tarea adquiere la máxima importancia. EthEl localiza al paciente y le lleva su medicación. Más tarde, cuando los residentes se encuentran absortos en un programa de televisión y sin otras obligaciones pendientes, EthEl asume el deber de cuidar de sí mismo y regresa a un punto de recarga.

Los estudios en ética artificial no se hallan sino en sus albores. Nuestros resultados, si bien preliminares, nos animan a pensar que es posible que una máquina elabore principios éticos útiles para guiar el comportamiento de los robots. Ello facilitaría que los humanos aceptásemos sus conductas, ya que el temor a unas máquinas carentes de ética seguramente provocaría un rechazo total hacia cualquier robot autónomo. Podemos decir que lo que está en juego es el futuro de la misma inteligencia artificial.

Por último, creemos que la ética artificial puede realizar aportaciones al estudio de la ética: a la hora de aislar la esencia de la conducta ética de las personas, puede que los planteamientos concretos y cotidianos que afronta la IA resulten más efectivos que las abstractas teorías éticas de algunos académicos. E incluso puede que una máquina debidamente entrenada lograse comportarse de un modo más ético que muchas personas, ya que serían capaces de obrar con imparcialidad, algo que los humanos no siempre conseguimos. Quizás algún día la interacción con uno de tales robots nos sirva de inspiración para un comportamiento más ético por nuestra parte.

PARA SABER MAS

IEEE INTELLIGENT SYSTEMS. Número especial dedicado a la ética artificial. Julio-agosto de 2006.

UN ROBOT EN CADA CASA. Bill Gates en *Investigación y Ciencia*, n.º 366; marzo de 2007.

MACHINE ETHICS. CREATING AN ETHICAL INTELLIGENT AGENT. Michael Anderson y Susan Leigh Anderson en *AI Magazine*, vol. 28, n.º 4, págs. 15-26; 2007.

MORAL MACHINES. TEACHING ROBOTS RIGHT FROM WRONG. Colin Allen y Wendell Wallach. Oxford University Press, 2008.

WAR OF THE MACHINES. P. W. Singer en *Scientific American*, vol. 303, n.º 1, págs. 56-63; julio de 2010.

CORTESIA DE RANDOM HOUSE (*portada de Yo, robot*); MGM/COLECCION KOBAL (*HAL 9000*); AFP/GETTY IMAGES (*Kaspárov y Deep Blue*)

En busca de una cura para el autismo

Ante la falta de soluciones médicas, los padres de niños autistas acuden a terapias poco fiables y, en ocasiones, arriesgadas

Nancy Shute





Jim Laidler y su mujer comenzaron a buscar ayuda cuando a su hijo mayor, Benjamin, le fue diagnosticado autismo. Pero los neurólogos desconocían la causa de la enfermedad y la manera en la que evolucionaría su hijo. Nadie les decía: "Esta es la causa y aquí tienen el tratamiento".

Sin embargo, tras consultar en la Red, ese matrimonio de Portland halló docenas de tratamientos "biomédicos" que prometían mejoras o incluso la curación del mutismo, los problemas de relación social y las dificultades motrices de Benjamin. Así las cosas, intentaron algunas terapias con su hijo. Empezaron con vitamina B_6 y magnesio, dimetilglicina y trimetilglicina (suplementos nutricionales), vitamina A, secretina (hormona digestiva), dietas sin gluten ni caseína e incluso con la quelación (tratamiento farmacológico que purga el cuerpo de plomo y mercurio). Esos supuestos tratamientos le fueron aplicados asimismo a David, hermano pequeño de Benjamin y también diagnosticado con autismo.

La quelación no parecía servir de mucho. Si la secretina ejercía algún efecto, no era fácil de identificar. Las dietas parecían prometedoras, de modo que la familia cargaba a todas partes con comida especial. Los padres daban a los chicos docenas de suplementos y ajustaban una y otra vez las dosis ante cada cambio de conducta.

La ineficacia de aquellos experimentos se hizo patente cuando la madre, cada vez más escéptica, dejó de administrar los suplementos a Benjamin. Esperó dos meses antes de decírselo a su marido. Su silencio se interrumpió el día en que, durante un viaje familiar a Disneylandia, Benjamin tomó un gofre en un bufé y lo devoró. Los padres miraron horrorizados. Se hallaban convencidos de que su hijo experimentaría una regresión tan pronto como abandonase la dieta. No ocurrió así.

Jim Laidler podía habérselo imaginado. Es anestesista. Sabía desde el principio que aquellos tratamientos nunca se habían sometido a ensayos clínicos aleatorizados, la prueba de fuego de cualquier terapia. "Al principio traté de resistirme", afirma, pero la esperanza venció al escepticismo.

Cada año, centenares de miles de padres sucumben ante el deseo de encontrar algo, cualquier cosa, que alivie las dificultades de sus hijos para hablar y comunicarse, su incapacidad para relacionarse socialmente o sus comportamientos repetitivos o restrictivos, como el aleteo de manos o la fijación con ciertos objetos. De acuerdo con algunos estudios, hasta un 75 por ciento de los niños autistas reciben tratamientos "alternativos" ajenos a la ortodoxia médica. Sin embargo, muchas de esas terapias resultan falsas. Su seguridad y eficacia no se han investigado, las hay muy caras y algunas resultan perjudiciales. Por fortuna, el reciente incremento en el diagnóstico y el activismo de numerosas familias están propiciando que cada vez más fondos, tanto públicos como privados, se destinen a obtener resultados contrastados científicamente.

Sin causa ni curación

La demanda de terapias se encuentra en aumento. En gran parte, ello se debe a que el cuadro clínico que define el autismo es cada vez más amplio, por lo que más niños son diagnosticados con la enfermedad. En la década de los setenta, cuando era denominado "psicosis infantil" (una combinación de defectos sociales y retraso mental), el trastorno se consideraba excepcional. Los pediatras pedían paciencia a los padres si, por ejemplo, su bebé de ocho meses aún no establecía contacto ocular.

Por aquel entonces, los estudios indicaban que unos cinco de cada 10.000 niños padecían autismo. Pero la cifra creció cuando la enfermedad pasó a definirse como trastorno de espectro autista, un cuadro que incluía síntomas más leves. La revisión de 1994 del *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* (o DSM, la biblia del diagnóstico psiquiátrico) añadió el síndrome de Asperger (una variante de alto funcionamiento popularizada en el filme *Rain Man*) y un cajón de sastre al que se describió como "trastorno generalizado del desarrollo, sin más especificación". Los expertos comenzaron a apreciar los beneficios de un diagnóstico y tratamiento precoces. En 2007, la Academia Estadounidense de Pediatría recomendó la detección precoz del autismo en todos los niños de 18 a 24 meses. Por entonces, la tasa se había disparado hasta uno de cada 110 niños.

Dado que apenas se conocen las causas de la enfermedad, no queda claro que un mayor número de diagnósticos se deba a un aumento en el número de casos. "En la inmensa mayoría de los pacientes ni siquiera existe un factor genético claro", comenta David Amaral, director de investigación del Instituto MIND de la Universidad de California en Davis y presidente de la Sociedad Internacional para la Investigación del Autismo. No existen biomarcadores para

CONCEPTOS BASICOS

- Hasta un 75 por ciento de los niños autistas reciben terapias alternativas cuya eficacia nunca ha sido evaluada científicamente.
- Algunos profesionales recetan fármacos cuyo uso sólo ha sido aprobado para el tratamiento de otras enfermedades, con graves efectos secundarios y cuya seguridad y eficacia en casos de autismo jamás se han investigado.
- En la última década, la financiación estadounidense al respecto ha aumentado en un 15 por ciento anual. A ello han contribuido un aumento en la demanda de tratamientos comprobados y una mayor concienciación.
- Las variaciones genéticas recién descubiertas en niños con autismo quizás apunten a una causa, si bien las terapias asociadas aún podrían demorarse años.

determinar qué niños corren riesgo ni para calibrar la respuesta a un tratamiento. En su mayoría, la investigación se ha centrado en el desarrollo de terapias conductuales destinadas a mejorar la relación y la comunicación con los demás. Con resultados variables, tales tratamientos sí parecen ayudar a algunos niños.

La falta de terapias establecidas ha facilitado sobremanera la tarea de los vendedores de tratamientos sin contrastar. “El resultado es una combinación de pseudociencia y fraude”, declara Stephen Barrett, psiquiatra retirado que mantiene el sitio quackwatch.com, donde analiza tratamientos de eficacia dudosa. “Los padres sufren un gran estrés y sólo desean lo mejor para su hijo. Cuando observan una mejora, otorgan credibilidad a la causa equivocada”. Pero tales progresos no se deben a los “tratamientos”, afirma, sino a la propia maduración del niño.

Los vendedores de humo inundan la Red. Algunos portales prometen a los padres “vencer el autismo de su hijo” si adquieren un libro que cuesta 299 dólares. Otros muestran vídeos donde se ven “los progresos de una niña autista tras haber recibido inyecciones de células madre”. Numerosos padres se informan a través de Internet y, según Brian Reichow, del Centro de Estudio Infantil de Yale, “muchos de ellos confían en informes anecdóticos, en amigos u otros padres. En lo referente al autismo, la investigación aún no ha llegado al tratamiento”.

Comprar esperanza tampoco resulta barato. Las sesiones en una cámara de oxígeno hiperbárico (dispositivos concebidos para elevar de manera temporal los niveles de oxígeno en sangre y empleados para combatir el síndrome de descompresión) ascienden a unos 100 dólares la hora; se recomiendan entre una y dos sesiones diarias. Las terapias de integración sensorial, que pasan por envolver a los niños en mantas o introducirlos en una “máquina de abrazos” para que jueguen con arcilla perfumada, llegan a los 200 dólares la hora. Las consultas pueden alcanzar los 800 dólares, y el coste aumenta en varios miles si se incluyen vitaminas, suplementos o pruebas de laboratorio.

De acuerdo con una encuesta de la Red de Autismo Interactiva, del Instituto Kennedy Krieger en Baltimore, los padres invierten un promedio de 500 dólares al mes en gastos menores. El único tratamiento que hasta ahora ha mostrado cierta eficacia, la terapia conductual, es también el más caro: 33.000 dólares o más al año. A pesar de que, a menudo, los programas estatales de intervención precoz y los distritos escolares públicos cubren los gastos, existe una larga espera para la obtención de evaluaciones y servicios gratuitos. En conjunto, según la Escuela de Salud Pública de Harvard, el promedio de todos los costes directos e indirectos derivados del autismo asciende a 72.000 dólares al año.

Remedios fraudulentos

Entre las terapias no contrastadas se incluyen las farmacológicas. Algunos facultativos recetan medicamentos aprobados para otras enfermedades, como Lupron. Este fármaco, que bloquea la producción de testosterona en los hombres y la de estrógenos en las mujeres, se emplea para el tratamiento del cáncer de próstata y en la castración química de delincuentes sexuales. Otros ejemplos son el antidiabético Actos y la inmunoglobulina G intravenosa, utilizada en casos de leucemia y sida infantiles. Todos ellos presentan serios efectos secundarios y su seguridad o eficacia en casos de autismo jamás se han investigado.

La quelación, el principal tratamiento contra la intoxicación por plomo, constituye otra terapia legítima trocada en “cura” para el autismo. El agente quelante transforma el plomo, el mercurio y otros metales en compuestos inertes para que el organismo los expulse con la orina. Hay quien cree que la exposición a estos metales (sobre todo al etilmercurio, utilizado a modo de conservante en vacunas) produce autismo. Sin embargo, no hay ningún estudio que lo demuestre. De hecho, los casos de autismo diagnosticados continúan aumentando a pesar de que, en 2001, el etilmercurio desapareció de la mayoría de las vacunas. Y la quelación, sobre todo en la administración intravenosa que se publicita contra el autismo, puede ocasionar insuficiencia renal. En 2005, un niño autista de cinco años falleció en Pennsylvania tras recibir quelación intravenosa.

Esta preocupación hizo que el Instituto de Salud Mental estadounidense (NIMH) anunciara en 2006 planes para realizar un ensayo clínico riguroso. Pero la investigación se archivó en 2008 ya que no se halló “ninguna prueba clara de un beneficio directo contra el autismo” y porque la quelación “incrementaba el riesgo de los niños por encima del mínimo”. La inquietud surgió, en parte, a raíz de estudios de laboratorio que revelaban problemas cognitivos en ratas que habían recibido quelación en ausencia de una intoxicación metálica. “No creo que nadie tuviera demasiada fe en que la quelación fuese la respuesta”, señala Thomas R. Insel, director del NIMH, quien añade que sus investigadores se sienten más inclinados a experimentar con medicamentos cuyo mecanismo de acción es conocido.

Como era de esperar, el abandono de la investigación alimentó las acusaciones de que

La autora

Nancy Shute lleva más de 20 años informando sobre neurociencia y salud infantil. Es redactora de *News & World Report*.

ALTERNATIVAS

Terapias de eficacia dudosa

Algunos padres se muestran ansiosos por probar nuevas terapias, en ocasiones de manera simultánea, aun cuando a menudo no se disponga de ninguna demostración científica de su eficacia. Aquí se ofrecen algunos ejemplos frecuentes. Estos medicamentos no han sido aprobados para su empleo en pacientes con autismo. Los costes, riesgos y la duración de los tratamientos sólo son orientativos.

Inmunoglobulinas
10.000$ por inyección
Anticuerpos inyectables aprobados para el tratamiento de leucemia y sida. Pueden producir dolores de cabeza y meningitis.

Vitaminas y suplementos
Los costes y riesgos (aparte de la sobredosis) resultan moderados, pero cuesta discernir los beneficios.

Células madre
15.000$
Se inyectan durante varios días. No se permite su administración en EE.UU., pero sí en otros países.

Lupron
5000$ al mes
Medicamento inyectable empleado en casos de cáncer de próstata. Puede producir daño óseo, detener el crecimiento y ocasionar impotencia.

Terapia de integración sensorial
6000$ al año
Aplicación de presión sobre el cuerpo con mantas o máquinas. Puede incluir aromaterapia.

Cámara de oxígeno hiperbárico
3000$ por tres meses
Aplicación de oxígeno presurizado en el interior de una cámara cerrada. Puede afectar a oídos, ojos, pulmones y sistema nervioso central.

Quelación
3000$ por seis meses
Inyección de un fármaco empleado para purgar el plomo y el mercurio. Puede disminuir los niveles de calcio y producir insuficiencia renal.

Secretina
90$ por semana
Hormona inyectable. Puede ocasionar reacciones inmunitarias y diarrea.

Dietas sin gluten ni caseína
Los costes resultan moderados y los riesgos bajos, pero cuesta discernir los beneficios.

BRYAN CHRISTIE

la "gran ciencia" despreciaba los tratamientos alternativos. Pero siempre se ha invertido más en hallar terapias efectivas que en desacreditar las inútiles. Hasta hace muy poco, casi toda la investigación sobre el autismo se ejercía en el campo de las ciencias sociales y de la educación especial, donde los presupuestos son bajos y los protocolos difieren mucho de los empleados en medicina. A menudo, en un estudio participa sólo un niño. "A algo así no lo llamaríamos ni indicio", comenta Margaret Maglione, directiva de uno de los centros de la corporación estadounidense RAND (Research and Develepement), quien se encuentra a cargo de una investigación financiada con dinero público y destinada a revisar las terapias conductuales. Sus resultados se publicarán en 2011.

Pocos resultados

En resumen, la eficacia de numerosos tratamientos jamás ha sido sometida a pruebas médicas con criterios modernos. Y, cuando éstas se han hecho, se han llevado a cabo en grupos muy poco numerosos.

En 2007, la Colaboración Cochrane, un organismo independiente de evaluación de la investigación médica, sometió a examen las dietas sin caseína ni gluten. La premisa de las mismas era que la caseína (proteína de la leche) y el gluten (proteína del trigo) interferían con los receptores cerebrales. La Colaboración Cochrane halló dos ensayos clínicos muy reducidos, uno con 20 participantes y el otro con 15. En el primero se observó cierta reducción de los síntomas; en el segundo, ninguna. En

La eficacia de numerosos tratamientos jamás ha sido sometida a pruebas médicas con criterios modernos. Y, cuando éstas se han llevado a cabo, ha sido en grupos reducidos.

un nuevo ensayo controlado y aleatorizado con 14 niños, que fue publicado en mayo de 2010 por Susan Hyman, profesora de pediatría en la Universidad de Rochester, no se advirtieron cambios en la atención, el sueño o el ritmo intestinal de los niños, así como tampoco en sus comportamientos autistas. "Se están acumulando pruebas que apuntan a que [la dieta] no constituye la panacea que anhelaban los afectados", declara Susan Levy, pediatra del Hospital Infantil de Philadelphia, quien, junto con Hyman, evaluó las pruebas.

Levy conoce de primera mano lo difícil que resulta modificar algunas creencias instaladas en la opinión pública. La secretina se puso de moda después de que, en 1998, un estudio afirmase que tres niños habían experimentado mejoras en el contacto ocular, el estado de alerta y el uso del lenguaje expresivo tras recibir la hormona durante una prueba diagnóstica de problemas gastrointestinales. Los medios de comunicación se hicieron eco de las alentadoras historias paternas sobre la transformación de los niños. El Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano se apresuró a financiar ensayos clínicos. Pero, en mayo de 2005, ninguno de los cinco ensayos aleatorizados había conseguido confirmar beneficio alguno, por lo que el interés hacia la secretina decayó. Levy, quien colaboró en varios de los estudios, apunta que hubieron de pasar varios años: "La investigación exige una gran dedicación y avanza con lentitud. Los padres se sienten indefensos y se hallan dispuestos a remover cielo y tierra".

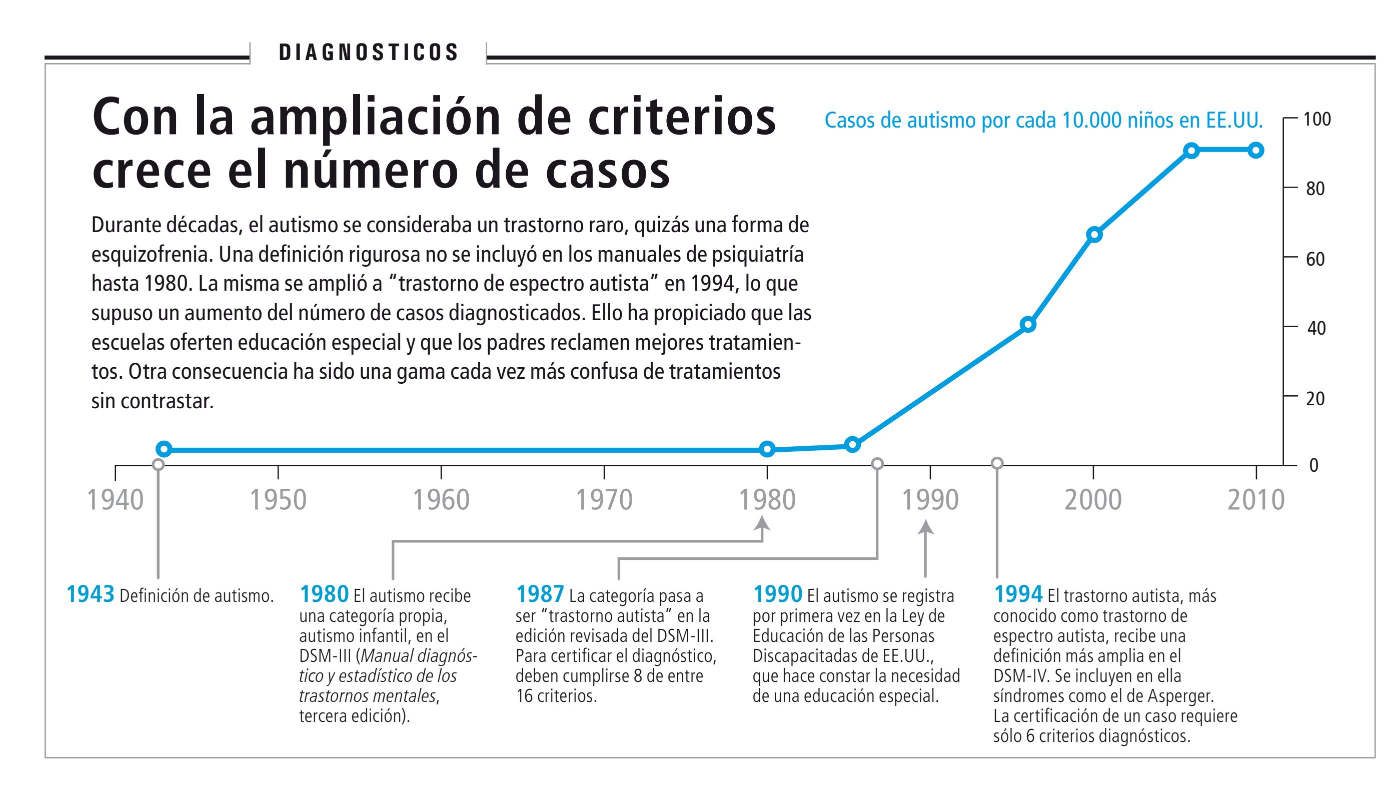
La buena noticia es que el aumento en la demanda de tratamientos supone un reclamo para la financiación. En 2001, el número de asistentes al primer Encuentro Internacional sobre Investigación del Autismo apenas llegó a 250. El pasado mes de mayo, al mismo encuentro en Filadelfia acudieron 1700 investigadores, doctorandos y representantes de los progenitores. Las nuevas técnicas y la concienciación pública han convertido el autismo en una línea más atractiva para la investigación. Ya a mediados de la década de los noventa, los padres comenzaron a adoptar las refinadas tácticas de defensa de intereses y búsqueda de financiación empleadas por los afectados de sida o cáncer de mama, quienes se benefician tanto del apoyo estatal como de fundaciones privadas.

En consecuencia, durante el último decenio la financiación en EE.UU. ha aumentado en un 15 por ciento anual, sobre todo aquella destinada a la investigación de aplicaciones clínicas. En 2009, el Instituto Nacional de Salud estadounidense asignó 132 millones de dólares para la investigación del autismo, a los que se sumaron 64 millones gracias a la Ley de Recuperación y Reinversión. Gran parte del dinero se ha destinado a la elaboración de registros de pacientes y a otras herramientas de investigación. Fundaciones privadas, como la Fundación Simons o Autism Speaks, aportaron 79 millones en 2008. De acuerdo con esta última, cerca del 27 por ciento de los fondos ha recaído en la investigación sobre tratamientos, el 29 por

DIAGNOSTICOS

Con la ampliación de criterios crece el número de casos

Durante décadas, el autismo se consideraba un trastorno raro, quizás una forma de esquizofrenia. Una definición rigurosa no se incluyó en los manuales de psiquiatría hasta 1980. La misma se amplió a "trastorno de espectro autista" en 1994, lo que supuso un aumento del número de casos diagnosticados. Ello ha propiciado que las escuelas oferten educación especial y que los padres reclamen mejores tratamientos. Otra consecuencia ha sido una gama cada vez más confusa de tratamientos sin contrastar.



BRYAN CHRISTIE (*gráfica*); FUENTE: CENTROS PARA EL CONTROL Y PREVENCION DE ENFERMEDADES DE EE.UU. Y ASOCIACION DE PSIQUIATRIA AMERICANA

ciento en el estudio de las causas, el 24 por ciento en biología básica y el 9 por ciento en el diagnóstico.

Tales iniciativas también intentan averiguar si la terapia conductual precoz, que trata de mejorar las habilidades sociales de los niños a través de la repetición y la recompensa, podría aplicarse con éxito en niños muy pequeños, cuyo cerebro se halla en pleno aprendizaje del lenguaje y las relaciones sociales. En 2009, un estudio de varias universidades reveló que, en niños que habían comenzado entre los 18 y los 30 meses de edad, dos años de terapia conductual a razón de 31 horas semanales supusieron un incremento sustancial del cociente intelectual (17,6 puntos frente a los 7 puntos del grupo de control). También se registraron mejoras en las tareas cotidianas y en el uso del lenguaje. La mejora en 7 de los 24 niños fue tal que su diagnóstico evolucionó de "autista" a la variante "sin otra especificación", más leve. Por el contrario, de entre los 24 niños que habían recibido otras terapias, sólo uno experimentó la misma mejoría. La Red para el Tratamiento del Autismo ha elaborado un registro de más de 2300 niños con el objeto de combatir las complicaciones médicas que tantas veces sufren los afectados, como los problemas gastrointestinales y las dificultades para dormir. También prevé elaborar directrices para pediatras.

Por un verdadero enfoque científico

La búsqueda de medicamentos, incluidos aquellos que se utilizan para otras enfermedades neurológicas, continúa siendo problemática. Insel reconoce que las intervenciones farmacológicas han resultado frustrantes. Los antidepresivos que aumentan los niveles de serotonina (neurotransmisor), por ejemplo, reducen con gran eficacia los movimientos repetitivos de la mano en pacientes con trastorno obsesivo-compulsivo. Sin embargo, según la Colaboración Cochrane, esos fármacos no alivian los movimientos repetitivos característicos de los autistas.

Otros candidatos incluyen un fármaco que potencia la fase REM del sueño, inexistente en niños con autismo, así como la oxitocina, una hormona que facilita el parto y la lactancia y que, supuestamente, estimula el vínculo maternofilial. En un estudio publicado en febrero de 2010 por el CNRS francés, 13 adolescentes con síndrome de Asperger identificaron mejor imágenes de rostros tras haber inhalado oxitocina. Pero, para concluir a partir de ese estudio que la oxitocina mitiga los síntomas más devastadores del autismo, habría que dar un gran salto. Insel opina que aún es mucho el trabajo que resta por hacer.

Por fortuna, ese trabajo ya se ha puesto en marcha. En junio pasado, un análisis genético realizado con 996 escolares reveló variantes genéticas nuevas entre niños con autismo. Algunas afectaban a genes encargados de controlar la sinapsis, uno de los principales objetos de investigación en el autismo. "Las mutaciones reales [entre sujetos] difieren, pero podría haber rasgos comunes", explica Daniel Geschwind, director del estudio y profesor de neuropatía y psiquiatría de la Universidad de California en Los Angeles. Geschwind es cofundador del Autism Genetic Resource Exchange, una base de datos de muestras de ADN procedentes de más de 1200 familias con casos de autismo, la cual se utilizó en el estudio. No obstante, tanto las pruebas que aíslen las causas como las terapias que solucionen el problema se encuentran aún a años vista.

Hoy se observa un aumento en el número de padres que renuncian a experimentar. Cuando a Nicholas, hijo de Michael y Alison Giangregorio, le fue diagnosticado autismo a la edad de dos años, los padres decidieron recurrir sólo a tratamientos comprobados, como el análisis conductual aplicado. "Ya resulta muy difícil y costoso ayudar a tu hijo", afirma Michael. "No tenía ganas de ensayar terapias experimentales, sino sólo aquellas a las que los expertos han dedicado tiempo para comprobar que son efectivas y que no provocan daño adicional."

Nicholas tiene ahora nueve años y, aunque sigue sin verbalizar, la terapia conductual le ha enseñado a utilizar señales cuando necesita ir al baño. Hoy se lava las manos, se sienta a cenar en el restaurante y recorre el pasillo de una tienda sin aletear las manos. "Por supuesto, el objetivo de mi familia, como el de la mayoría, es llevar una vida lo más normal posible", concluye Michael, un operador de Wall Street de 45 años. "Normal significa salir a cenar toda la familia."

Para llegar al mismo lugar, el camino de Jim Laidler ha sido más tortuoso. A pesar de confiar en las terapias alternativas, intentó persuadir a los profesionales de que aplicasen el rigor científico para evaluar esas opciones. "Insistí una y otra vez. ¿Han hecho algún control?", relata. Su hijo mayor, ahora de 17 años, probablemente nunca será capaz de valerse por sí solo. Pero el menor acude a clases regulares de enseñanza media. Sobre los numerosos tratamientos que han intentado, Jim, de 51 años, concluye: "En esencia, se trata de chamanismo con una bata de laboratorio". Miles de padres desesperados confían en que la ciencia les ofrezca algún día una medicina más robusta.



JIM LAIDLER califica las terapias actuales de "chamanismo". Ante la desesperación, también él ha intentado algunas con sus hijos.

PARA SABER MAS

APNA, Asociación de Padres de Personas con Autismo: www.apna.es

FESPAU, Federación Española de Asociaciones de Padres de Personas con Autismo: www.fespau.es

AUTISM GENETIC RESOURCE EXCHANGE. Base de datos de acceso libre de muestras de ADN procedentes de familias con casos de autismo: www.agre.org

CONNECTING GENES TO BRAIN IN THE AUTISM SPECTRUM DISORDERS. B. S. Abrahams y D. H. Geschwind en *Archives of Neurology*, n.º 67, abril de 2010.

Tamaño cerebral e inteligencia

Observaciones en chimpancés y delfines refuerzan la hipótesis de la existencia de una inteligencia parecida a la humana en otras especies

Maddalena Bearzi y Craig Stanford

Cuando amanece en el Parque Nacional de Gombe, en Tanzania, el sol tarda algún tiempo en despuntar sobre la cordillera situada al este y alcanzar con sus rayos cálidos el bosque que hay debajo. Allí, una cuadrilla de chimpancés se va despertando. Uno tras otro, se desperezan, observan el cielo matutino y poco a poco vuelven a la actividad. Cada uno se halla sentado en la rama que sostiene su nido y orina en silencio sobre el suelo, situado varios metros más abajo. En cada árbol hay uno o dos nidos; un árbol altísimo del género *Chrysophyllum* alberga varios de ellos. En pocos minutos, la silenciosa banda desciende para sentarse sobre la colina, como si de grandes piedras se tratara.

Después, como si obedeciera a una señal, uno de los machos más viejos se levanta y empieza a andar. Sale del área de descanso y se dirige hacia el norte. Varios machos lo siguen, pero dos orientan sus pasos hacia un lago situado al oeste. Una madre y su hijo se encaminan hacia el sur, solos. Un par de machos jóvenes permanecen en el lugar; más tarde se dirigirán hacia el este subiendo por las abruptas colinas. Los 26 chimpancés que anidaban juntos al alba se han dividido ahora en al menos cinco grupos, de uno a ocho individuos cada uno, a punto de iniciar un día lleno de decisiones y encuentros sociales complicados.

Al otro lado del mundo, el alba empieza a iluminar la costa de la península del Yucatán, en México. Con la precisión de un reloj, un grupo de delfines pasa en este momento frente al destartalado muelle de pescadores. Gordo, un macho regordete de delfín mular con una muesca profunda y clara en su aleta dorsal, aparece el primero en la niebla matutina. Se abre camino lentamente hacia el oeste a lo largo de la costa; el resto del grupo le sigue a unos 100 metros de distancia. Al brillar el sol, van desfilando ante el embarcadero un cuerpo gris oscuro tras otro, hasta un total de 14 delfines: una hembra con su cría y otros 12. Unos veinte metros más allá del muelle, se reúnen junto a un colorido conjunto de barcas atracadas. Algunos bucean, otros se arremolinan en la superficie.

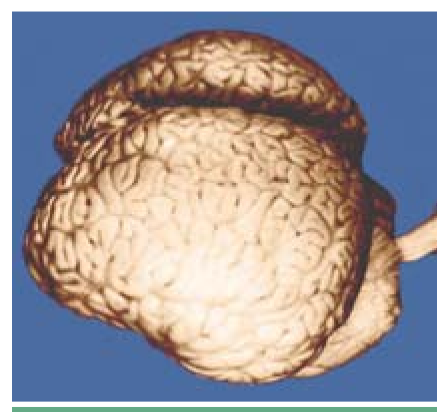
En pequeños grupos, los delfines exploran sin prisa el fondo arenoso, mientras otros van llegando de la dirección opuesta para unirse a ellos. Ahora suman 23, entre ellos dos crías junto a sus madres, todos congregados en una zona de agua oscura que tal vez esconda una buena pitanza. De repente, el círculo se despliega en dos hileras: cinco animales se retiran de manera uniforme hacia el embarcadero en una procesión casi monacal; los demás desaparecen rápidamente hacia el oeste. El sol se sitúa ya sobre el horizonte. Lo que durante un momento pareció una formación singular y cohesionada se ha reorganizado y separado en grupos, dispuestos a las complejas tareas e interacciones que constituirán su actividad cotidiana.

1. CHIMPANCES Y DELFINES parecen tener poco en común. Pero ambos poseen un cerebro relativamente grande y la inteligencia necesaria para medrar en ambientes sociales complejos y fluidos. En la fotografía superior, chimpancés en Tanzania se reúnen alrededor de un macho alfa y le solicitan compartir la carne de corzo que éste sujeta. En la fotografía inferior, delfines comunes costeros, entre ellos una cría muy pequeña, avanzan juntos en aguas de Baja California.

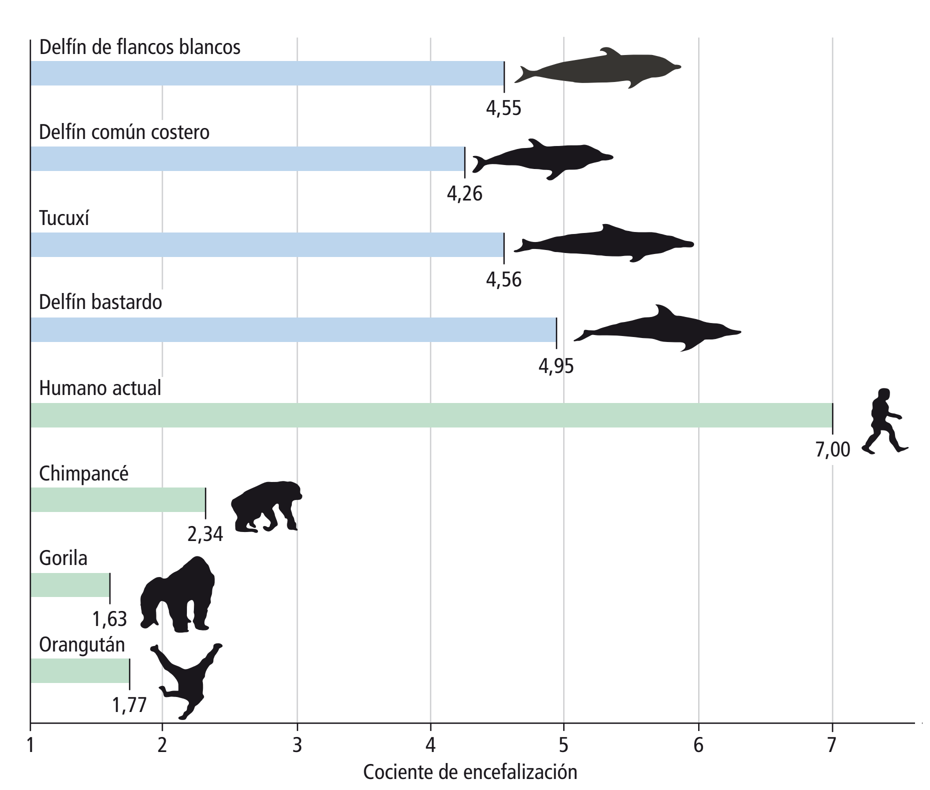
CONCEPTOS BASICOS

- Primates y cetáceos están dotados de un gran tamaño cerebral, asociado a un elevado cociente de encefalización, y de una inteligencia parecida a la humana.
- Los datos demuestran que esa inteligencia responde a una evolución convergente de esas especies respecto a ese rasgo. La capacidad cerebral les ha otorgado habilidades de comunicación y sociales complejas, una adaptación evolutiva que ha favorecido en ellas la supervivencia y la reproducción.
- Numerosas pruebas indican que simios y delfines poseen capacidad de lenguaje, y además se reconocen a sí mismos como individuos.


ANUP SHAH/NATURE PICTURE LIBRARY (*arriba*); MARK CARWARDINE/NATURE PICTURE LIBRARY (*abajo*)/*American Scientist*







2. EL CEREBRO DE UN DELFIN MULAR (*arriba*) y de un ser humano (*abajo*) difieren sustancialmente en su anatomía. Pero muestran semejanzas importantes. En ambos, la neocorteza se halla más desarrollada que en otros animales. Además, ambos presentan un pliegue de la corteza cerebral y cuentan con neuronas de Von Economo, que se han relacionado con la inteligencia social en las personas. Un rasgo sorprendente es su elevado cociente de encefalización (CE) —un indicador de la inteligencia— debido al gran tamaño del cerebro con respecto al del cuerpo. Aunque el CE promedio es 1, los primates (especialmente los humanos), los delfines y las ballenas presentan valores muy superiores.

Chimpancés y delfines parecen tener poco en común. Mientras que los primeros se asemejan a los humanos, el cuerpo de los segundos recuerda más bien un misil de crucero. Unos poseen manos que emplean para construir utensilios, acicalar a un compañero o comunicarse en un lenguaje de signos. Los otros carecen de manos. Los chimpancés se balancean a través de los bosques africanos. Los delfines atraviesan nadando las profundidades oceánicas. El antepasado común de ambos mamíferos, tan emparentados entre sí como lo están ratones y elefantes, se remonta a hace unos 100 millones de años. Tan sólo la disección permite comprobar que sus órganos y extremidades comparten rasgos similares.

Uno de los autores (Bearzi) es mastozoóloga marina. Ha estudiado los delfines mulares y otras especies de delfines durante casi 20 años en la bahía de Santa Mónica, cerca de Los Angeles, y en otras partes del mundo. El otro (Stanford), primatólogo, ha investigado chimpancés y gorilas en Africa durante más de 15 años. Por extraño que parezca, ambos científicos han descubierto un mayor paralelismo en la conducta de esas especies que en la de otros animales más estrechamente emparentados. Resulta aún más fascinante que muchos de los rasgos distintivos de su comportamiento se hallen también en los humanos, una observación que permite conocer mejor el origen de la inteligencia humana.

Quizás el tipo de inteligencia humana no sólo surgiera en nuestro linaje evolutivo reciente. En vez de ello, puede que apareciera como consecuencia de una evolución convergente. Todavía no hay pruebas irrefutables a favor de ese razonamiento, pero cada vez más indicios lo refuerzan. Todos se basan en una cualidad insólita compartida por humanos, chimpancés y delfines: el gran tamaño del cerebro.

Una inteligencia especial

De todas las especies de nuestro planeta, sólo un puñado posee un grado elevado de intelecto: simios y humanos (incluidas muchas formas extinguidas de ambos), delfines, ballenas y algunas otras, como los elefantes. El cerebro de un simio y el de un delfín difieren en su morfología externa y en su organización neuroanatómica, en particular en su citoarquitectura cortical, con una menor diferenciación celular en los delfines. A pesar de dichas diferencias, los cerebros de primates (incluidos los humanos) y delfines comparten rasgos importantes. A lo largo de la evolución, los cerebros de delfines y simios fueron adquiriendo un mayor tamaño y complejidad. Ambos tipos cerebrales cuentan con un cociente de encefalización (CE) elevado debido a la proporción inusualmente grande entre el tamaño del cerebro y el del cuerpo. El CE corresponde a la relación entre el tamaño real del cerebro de un animal y el tamaño cerebral esperado sobre la base de mediciones hechas en otros animales de su tamaño. En los delfines y los simios, la neocorteza presenta, además, un desarrollo más complejo que en otros animales. También

CORTESIA DE LA COLECCION COMPARADA DE CEREBROS DE MAMIFEROS, MUSEO NACIONAL DE SALUD Y MEDICINA (*cerebros*); CORTESIA DE LORI MARINO, UNIVERSIDAD DE EMORY (*gráfica*)/*American Scientist*

son distintivas la girificación neocortical, o replegamiento de la corteza cerebral (que en los delfines sobrepasa al de cualquier primate) y la presencia de neuronas de Von Economo, de forma alargada, que en los humanos se ha relacionado con la habilidad social y la capacidad de percibir el pensamiento de los demás. Esas neuronas se han descrito hace muy poco en los delfines mulares.

Pero, ¿por qué un cerebro voluminoso y complejo constituye una ventaja? Los dinosaurios poseían un cerebro diminuto, pero prosperaron durante millones de años. La inteligencia representa una adaptación, pero no necesariamente la única ni la más provechosa. Lo que funciona mejor para un organismo depende de su contexto ambiental. Algunos apenas han evolucionado desde hace millones de años. Otras estirpes, como los primates y los cetáceos, han experimentado cambios espectaculares y un gran aumento del tamaño cerebral en menos tiempo. La selección natural ha favorecido la inteligencia cuando ésta aumentaba la supervivencia y la reproducción y cuando confirmaba rasgos determinados genéticamente.

La capacidad cerebral ha dotado a delfines y simios de habilidades de comunicación y sociales complejas que sólo ahora empezamos a entender. A diferencia de la mayoría de los animales, simios y delfines viven en sociedades fluidas donde las relaciones se basan en el recuerdo de quién es amigo y quién debe un favor a quién. Forman alianzas sociales que van cambiando en función de sus necesidades. Los grandes simios poseen un intelecto que a menudo se califica de maquiavélico. Recuerdan favores que se les deben y deudas en las que han incurrido, y operan en una "economía de servicios" en la que intercambian funciones [*véase* "Así negocian los animales", por Frans B. M. De Waal; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2005]. Los chimpancés macho forman cuadrillas de vigilancia y cuadrillas de caza. También modifican sus alianzas en beneficio propio. Actúan con un grupo para obtener acceso sexual a una hembra y con otro para derrocar a un macho alfa. Antes se pensaba que algunas de esas alianzas se basaban en el parentesco; sin embargo, Anthony Goldberg y Richard Wrangham demostraron hace algunos años que no necesariamente era así.

Algunos delfines forman también coaliciones de machos con el fin de forzar sexualmente a las hembras. En fecha reciente, David Lusseau, de la Universidad de Aberdeen, observó que esos grupos cooperan, además, para vencer a otras coaliciones de machos. Se realizan así "acuerdos" complejos entre machos del mismo banco, que trabajan en parejas y tripletes para secuestrar a hembras en estro. En otros contextos, los delfines practican incluso el engaño y la impostura, conductas que exigen una teoría de la mente: la capacidad de percibir estados mentales en uno mismo y en los demás. El equipo de Stan Kuczaj, de la Universidad de Mississippi del Sur, observó el engaño intencionado en Kelly, un

Los autores

Maddalena Bearzi es presidenta y cofundadora de la Sociedad para la Conservación de los Océanos y periodista especializada en naturaleza. Se doctoró en biología por la Universidad de California en Los Angeles. Durante más de 20 años ha estudiado delfines y ballenas en California y en otras partes del mundo. **Craig Stanford** es profesor de antropología y biología en la Universidad de California del Sur y codirector del Centro de Investigación Jane Goodall. Se doctoró en antropología por la Universidad de California en Berkeley. Viene realizando investigaciones de campo sobre los grandes simios de Africa desde hace más de 15 años.

© American Scientist Magazine.

3. DELFINES Y CHIMPANCES exhiben en la naturaleza conductas inteligentes parecidas, como las que se ilustran aquí. Averiguar las complejidades de la organización social y de los comportamientos de delfines y chimpancés ha llevado un tiempo. La investigación en esos campos continúa arrojando nuevos resultados.

DELFINES



CHIMPANCES



American Scientist



4. LUCHA DE DELFINES. Esta fotografía singular se tomó en 1983, en un enfrentamiento entre alianzas de delfines de las bahías de Sarasota y de Tampa, en la costa de Florida. Los delfines muerden, hacen chocar su cuerpo contra los oponentes y golpean fuertemente con su cola. Este encuentro dejó a varios delfines con el rostro y las aletas ensangrentados. Los delfines macho forman alianzas principalmente para secuestrar a hembras, pero nuevos datos indican que también lo hacen para vencer a otras alianzas.

delfín hembra en cautividad. Al igual que sus compañeros de aljibe, Kelly había aprendido a recuperar objetos de la piscina a cambio de pescado. Pero en una ocasión, Kelly apareció en la superficie con algunos objetos de origen desconocido con la esperanza de obtener más pescado. Después de buscar en la piscina, el adiestrador descubrió un escondite donde, día tras día, el delfín había ocultado los objetos que los turistas dejaban caer inadvertidamente, para usarlos después como moneda de cambio con sus adiestradores. Al observarla con más atención, se comprobó que Kelly evitaba traer nuevos objetos a su escondite o sacarlos de él en presencia de otros delfines.

Los grandes simios también parecen practicar el engaño. En Tanzania, uno de los autores (Stanford) observó que un chimpancé macho de jerarquía baja, llamado Beethoven, utilizaba el engaño para aparearse con una hembra a pesar de la presencia de Wilkie, el macho alfa. Una banda de chimpancés se hallaba en un calvero del bosque y Beethoven realizó una exhibición de carga por todo el grupo; su pelo completamente erizado y su postura arqueada indicaban una bravata. Al tratarse de un macho de rango bajo, Wilkie interpretó esa acción como una insubordinación. Cuando Beethoven pasó ante Wilkie y se adentró en la densa espesura, éste lo persiguió al tiempo que hacía su propia exhibición, arrastrando ramas, golpeando los troncos de árboles con los pies y, en general, intentando impresionar al máximo. Con Wilkie abstraído en su exhibición de dominancia, Beethoven retornó furtivamente al calvero y copuló con una hembra que lo esperaba ansiosa.

Inteligencia y empleo de utensilios

Cada vez se conoce con mayor profundidad la manera en que chimpancés y delfines aplican su inteligencia para servirse de instrumentos. Jane Goodall y otros demostraron hace decenios que los chimpancés empleaban varitas para recolectar insectos. En 2007, la primatóloga Jill Pruetz publicó las observaciones que realizó su equipo en Senegal: un chimpancé utilizaba una ramita que había pelado y afilado para cazar a otro mamífero, algo que antaño sólo se había visto en humanos. El chimpancé introdujo el palo en cavidades de árboles hasta hallar y extraer con el mismo un gálago del Senegal, un primate del tamaño de una ardilla. Aunque no era exactamente una lanza, la varita constituía una prueba de que el chimpancé había previsto inmovilizar y extraer la presa que pretendía, y había ingeniado una solución.

Los delfines carecen de manos para manipular utensilios, pero las hembras de delfines mulares que viven en libertad en el océano Indico son los primeros cetáceos en los que se ha verificado el "empleo de útiles". El equipo de la bióloga marina Rachel Smolker observó a principios de los ochenta que las hembras llevaban, a modo de máscara, una gran esponja de forma cónica en la punta de su hocico alargado, o rostro. Esa especie de "mitones nasales" servían de protección contra organismos urticantes o la abrasión de la arena, o para extraer presas del fondo marino. En una publicación de 2005, el grupo de Michael Krützen, de la



5. LOS MACHOS DE CHIMPANCES forman grupos para merodear por los límites de sus territorios. Si se topan con individuos de otros grupos sociales, los persiguen o los atacan, a veces de manera brutal. La fotografía fue tomada en 1962 en el Parque Nacional de Gombe, en Tanzania, por el fotógrafo holandés Hugo van Lawick, el primer marido de la primatóloga Jane Goodall.



Universidad de Zúrich, demostró mediante análisis de ADN mitocondrial que esa conducta social se transmitía de madres a hijas dentro de un grupo matrilineal.

Un cerebro voluminoso no confiere en sí mismo la habilidad de emplear un utensilio, sino la capacidad de aprender e imitar el comportamiento de otro para apropiarse de sus ventajas. Los útiles permiten a los chimpancés obtener proteínas, grasas y carbohidratos que, de otra manera, les resultarían inasequibles. El alimento suplementario ayuda a una hembra gestante o lactante a superar las épocas de escasez y aumenta su rendimiento reproductivo a lo largo de la vida. La capacidad de responder a las rápidas dinámicas del grupo social, como cuando los machos forman coaliciones para controlar a las hembras, no está limitada a los primates superiores y a los delfines, sino que sin duda caracteriza a muchas de sus especies. Aunque esas habilidades requieren años de aprendizaje, la recompensa puede significar un mayor éxito reproductivo.

Durante años, el estudio de la cultura técnica de los chimpancés se basaba principalmente en anécdotas, fascinantes pero no siempre convincentes. Pero los estudios a largo plazo realizados en diversas comunidades naturales de chimpancés permitieron obtener pruebas inequívocas de que las tradiciones culturales seguían un patrón sistemático. A partir del empleo de utensilios y otros datos culturales procedentes de los siete estudios de campo de mayor duración, el equipo de Andrew Whiten, de la Universidad de Saint Andrews, describió en 1999 al menos 39 comportamientos atribuibles a la influencia de tradiciones aprendidas. Esa cifra parecería pequeña si se piensa en los numerosos ejemplos de dicha conducta en nuestra especie. Pero si se compara con otros animales no humanos, representa una cifra elevada. Se concluye entonces que los animales que sacan provecho de su ingenio poseen rasgos parecidos a los chimpancés y los humanos: un cerebro grande y un largo período de crecimiento y maduración, durante el cual adquieren las habilidades de la vida mediante la observación de los mayores y los iguales.

¿Cómo y por qué surgen y se extienden determinadas tradiciones culturales, ya sean comportamientos técnicos o sociales? La evolución biológica se da ante todo mediante selección natural y la transferencia de material genético de una generación a la otra. Se trata de un proceso ineficiente, debido a que los genes tardan un tiempo en pasar a la siguiente generación y a la necesidad de reorganizar los genes del padre y de la madre en cada acto reproductivo. En cambio, la "evolución cultural" no requiere la mezcla de la baraja genética y, por tanto, los cambios no son tan lentos. Si un rasgo cultural confiere a quien lo usa una mayor probabilidad de supervivencia y una reproducción mejorada, tiene buenas posibilidades de ser transmitido. Aunque el empleo de utensilios nuevos carezca de una base genética, una vez establecida su tradición, se extenderá para el beneficio reproductivo del inventor. Sucede así que un rasgo no genético ejerce a largo plazo un efecto sobre la especie. Sólo unos pocos grupos de animales muestran rasgos culturales, como los primates superiores y los cetáceos. Un buen ejemplo de aprendizaje



6. UN CHIMPANCE JUVENIL, llamado Mel, utiliza una ramita pelada para recolectar termes en el Parque Nacional de Gombe, en Tanzania, a mediados de los noventa. Más que ningún otro animal, a excepción de los humanos, los chimpancés inventan y emplean técnicas para procurarse comida y modificar su entorno.



7. EN SHARK BAY, en la costa occidental de Australia, se ha observado a delfines mulares utilizar esponjas marinas para buscar alimento. Mediante análisis de ADN mitocondrial, el equipo de Michael Krützen, de la Universidad de Zúrich, descubrió que esa práctica se daba casi exclusivamente en una matrilínea, lo que indicaba su transmisión de madres a hijas.

CORTESIA DE CRAIG STANFORD (*arriba*); CORTESIA DE MICHAEL HEITHAUS, UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE FLORIDA (*abajo*)/*American Scientist*



8. UN DELFIN MULAR, Akeakamai (Ake), se sitúa frente a un adiestrador como parte de unos experimentos sobre lenguaje realizados por el equipo de Louis Herman, del Laboratorio de mamíferos marinos del Acuario de Kewalo, en Honolulu. El adiestrador está realizando los cinco gestos que corresponden a la orden de cinco palabras: "*left basket right frisbee in*" (introducir disco derecho en cesto izquierdo). Para ejecutarla correctamente, Ake debe procesar los componentes semánticos y sintéticos del mensaje.

social en los delfines es la transmisión cultural vertical de especializaciones de búsqueda y obtención de alimento y de dialectos vocales. John Ford describió así lo que denominó "mimetismo de llamadas entre manadas" en la naturaleza y demostró que las orcas realizan un aprendizaje vocal.

Construcción del lenguaje

Los científicos discrepan sobre si los delfines poseen capacidad de lenguaje. Pero las pruebas indican que sí la tienen, en función de cómo se defina el lenguaje. El grupo de Louis Herman, del Laboratorio de mamíferos marinos del Acuario de Kewalo, en Honolulu, diseñó en los años ochenta dos lenguajes artificiales que enseñó a los delfines mulares de sus instalaciones. Los lenguajes no se parecían a la conversación humana, pero ambos estaban basados en un conjunto de reglas gramaticales. Uno era generado por ordenador e incluía palabras estridentes; el otro era un lenguaje de signos transmitido por los adiestradores mediante señales con las manos y brazos.

En una clase subacuática se enseñó varias frases a dos delfines, Ake y Phoenix. Consistían en órdenes que describían cómo tomar un disco volador (*frisbee*) a través de una anilla o cómo nadar alrededor de otro delfín. Se observó, asimismo, que los delfines podían identificar las frases sin sentido. De este modo, cuando un adiestrador pronunciaba una orden que carecía de significado en los lenguajes creados, Ake la ignoraba.

A lo largo de decenios se han ido recopilando pruebas sobre la capacidad de lenguaje en los simios, incluido el lenguaje de signos. Quizá la prueba más persuasiva proceda de la primatóloga Sue Savage-Rumbaugh, quien durante 30 años ha trabajado en el Centro de Investigación del Lenguaje de la Universidad estatal de Georgia. Savage-Rumbaugh demostró que Kanzi, un macho de bonobo, había aprendido a comunicarse tocando símbolos de un tablero léxico y comprendía el lenguaje hablado. La primatóloga estimaba que Kanzi podía emitir 300 palabras y comprender más de 1000 palabras habladas.

El trabajo de Savage-Rumbaugh y de otros investigadores ha zanjado dos cuestiones que se planteaban acerca del lenguaje de los simios. En primer lugar, demostró que los simios comprendían y empleaban el concepto de referencia y utilizaban palabras como símbolos para representar cosas de su alrededor. En segundo lugar, verificó que los primates combinaban esas palabras para hacer peticiones, dar información y realizar observaciones sobre su entorno. Si de verdad existe una diferencia entre lo que entiende Kanzi y un niño de un año de edad, los científicos todavía no lo han descubierto.

También hay indicios de que delfines y chimpancés se identifican a sí mismos como individuos. Ante el espejo, los chimpancés, gorilas, bonobos y orangutanes, así como los delfines mulares, no sólo se reconocen, sino que se dan cuenta de las manchas de pintura realizadas sobre su cuerpo durante experimentos. Aunque ello no demuestra que los animales posean una conciencia comparable a la humana, sí indica, al igual que su comportamiento en la naturaleza, que cuentan con funciones intelectuales.

De igual modo, puede que el gran tamaño del cerebro ayude a esos animales a obtener



9. UN MACHO DE BONOBO, llamado Kanzi, del Centro de Investigación del Lenguaje de la Universidad estatal de Georgia, empezó a aprender lexigramas, símbolos abstractos que representan palabras, a una edad temprana. La primatóloga Savage-Rumbaugh estimó que Kanzi acabó por aprender más de 1000 palabras habladas y emitir unas 300 utilizando lexigramas. Demostró así que los simios pueden comprender y emplear el concepto de referencia.



alimentos. La disponibilidad de éstos responde a una enorme variabilidad espacial y temporal. Numerosas especies de delfines persiguen cardúmenes de peces; los chimpancés aprovechan la aparición efímera de frutos maduros en las copas de los árboles. Predecir el lugar y momento apropiados para obtener alimentos constituye todo un reto. Los chimpancés, dotados de una enorme memoria espacial, hacen el seguimiento de árboles frutales concretos en las semanas anteriores a la maduración. Alcanzada ésta, retornan un día tras otro al lugar adecuado hasta consumir todos los frutos. Los delfines deben acometer una tarea aún más difícil: localizar bancos de peces que se desplazan rápidamente, sin hitos para orientarse como árboles, ríos y montañas. Para ello utilizan el sonar, un sistema extraordinariamente evolucionado que sólo hace poco los humanos han logrado reproducir para su propio uso. Pero además de sus adaptaciones meramente sensoriales, los delfines hacen buen uso de su inteligencia y su memoria para encontrar peces.

Los chimpancés se alimentan sobre todo de frutos, pero, como los delfines, también cazan. Y su caza es social. Atacan a grupos de monos que descubren durante sus paseos en busca de frutos en los bosques africanos. La persecución, captura y muerte de las presas son impresionantes, a menudo horribles y siempre ilustrativas de la naturaleza social de los chimpancés. Para un león, la cebra a la que persigue representa una pitanza, pero para un chimpancé, la posibilidad de matar y compartir la presa no sólo constituye un acto de nutrición, sino también de importancia social. Se ha demostrado que los machos utilizan la carne para negociar nuevas alianzas, provocar a antiguos rivales y asegurarse el nivel social. Los machos adultos y adolescentes realizan la mayor parte de la caza; en Gombe, alrededor del 90 por ciento. Las hembras también cazan, pero con mayor frecuencia reciben una parte de la carne que el macho ha conseguido, ya sea cazando o robándosela a otro. Aunque los chimpancés, machos o hembras, a veces cazan por su cuenta, la mayor parte de las cacerías son sociales.

Para muchas especies de delfines, la caza constituye también una tarea social. Los delfines son depredadores eficientes que utilizan agilidad e inteligencia para capturar su presa. Las orcas, los delfines de mayor tamaño, exhiben una de las prácticas de caza más cooperativas. Situadas en la cúspide de la cadena trófica, las orcas transeúntes se alimentan de mamíferos marinos pequeños, como focas que descansan en la playa o en témpanos de hielo. En el litoral de la Patagonia se ha observado que las orcas se coordinan para hacer caer al agua a esos animales. En ocasiones, la captura de un pinnípedo representa una lección para la cría, que empleará la misma técnica durante toda su vida. Grupos de orcas atacan también a ballenas de mayor tamaño que ellas, sin miedo o vacilación, con una elevada eficacia depredadora.

La habilidad cazadora de los delfines los convierte en un activo muy apreciado por otros habitantes del océano. En las aguas costeras de Los Angeles, uno de los autores (Bearzi) ha observado con frecuencia a otarios o leones de mar en la proximidad de delfines durante su búsqueda de alimentos. Ambas especies depredadoras se desplazan y alimentan juntas, sin hostilidad ni competencia evidentes. Los leones de mar sacan partido de la capacidad de ecolocación de los delfines comunes para obtener sus propias presas. Las diversas estrategias de caza descritas en las sociedades de delfines y simios reflejan de forma excelente su complejidad social y refuerzan la idea de la interconexión entre complejidad cerebral, social y ecológica.

Mejor conocidos, peor conservados

El mayor conocimiento de la inteligencia de los grandes simios y los delfines se está produciendo al tiempo que aumenta la amenaza sobre esos animales en todo el mundo. Al adentrarnos cada vez más en las selvas tropicales en busca de madera, tierras de cultivo y espacio para viviendas, alteramos el hábitat de los simios. La continua caza de esos animales está también haciendo estragos. Y cuando utilizamos los océanos como vertederos, estamos degradando el hábitat de los delfines. La pesca accidental de especies sin valor comercial en la actividad pesquera industrial, lo que se conoce como captura accesoria, representa uno de los problemas principales a los que se enfrentan esos animales. Muchos conservacionistas creen que dentro de un siglo los grandes simios vivirán únicamente en unos pocos santuarios protegidos o en cautividad. Las poblaciones de delfines son menos visibles que las de los grandes simios, pero sobre ellas se ciernen amenazas también insidiosas. En la actualidad, varias especies de delfines se hallan en situaciones difíciles de conservación: en peligro crítico, en peligro, amenazadas o en estado de conservación desconocido.

Tras varios años de estudiar delfines y simios en la naturaleza, los autores han llegado a la misma conclusión: si esas especies y los ecosistemas donde viven no se conservan y protegen, no sobrevivirán hasta el próximo siglo. Lamentablemente, esta previsión llega justo cuando empezamos a conocer mejor sus complejas capacidades e interacciones sociales.



10. ESTE DELFIN del Acuario de Nueva York, en Brooklyn, pasó mucho más tiempo mirándose en un espejo subacuático después de haber sido marcado con tinta temporal que cuando se simuló marcarlo o no se marcó. El delfín dio varias vueltas sobre sí mismo para poder ver una aleta que los investigadores habían simulado marcar. En otra ocasión, el delfín abrió la boca frente al espejo después de que le hubieran marcado la lengua, un comportamiento que no se había visto antes. La capacidad de reconocerse ante un espejo, un signo distintivo de la conciencia, se consideraba antes exclusiva de los humanos.

CORTESIA DE DIANA REISS/*American Scientist*

PARA SABER MAS

SPONGE CARRYING BY DOLPHINS (DELPHINIDAE, TURSIOPS SP.): A FORAGING SPECIALIZATION INVOLVING TOOL USE? R. Smolker et al. en *Ethology*, vol. 103, págs. 454-465; 1997.

CULTURES IN CHIMPANZEES. A. Whiten et al. en *Nature*, vol. 399, págs. 682-685; 1999.

MIRROR SELF-RECOGNITION IN THE BOTTLENOSE DOLPHIN: A CASE OF COGNITIVE CONVERGENCE. D. Reiss y L. Marino en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, págs. 5937-5942; 2001.

APES OF THE IMPENETRABLE FOREST. C. Stanford. Prentice Hall (Primate Field Studies Series); Upper Saddle River, NJ., 2007.

BEAUTIFUL MINDS: THE PARALLEL LIVES OF GREAT APES AND DOLPHINS. M. Bearzi y C. B. Stanford. Harvard University Press; Cambridge, 2008.

HOJAS ARTIFICIALES

Es posible que el combustible definitivo no proceda ni de cereales ni de algas, sino directamente del sol

Antonio Regalado

CONCEPTOS BASICOS

- Los vegetales producen su propio combustible químico (azúcares) a partir de luz, aire y agua, sin originar emisiones nocivas.
- Se están ideando hojas artificiales que podrían convertir luz solar y agua en hidrógeno, un gas combustible apto para automóviles, calefacción o generación de electricidad; se terminaría entonces nuestra dependencia respecto a los combustibles fósiles.
- Para llevar a la práctica esa idea, el nuevo dispositivo debería fabricarse en láminas delgadas y flexibles de bajo coste, tal vez a partir de nanofilamentos de silicio, y utilizar catalizadores económicos que facilitasen la producción eficiente de hidrógeno.

La conferencia que acaba de pronunciar Nathan S. Lewis sobre la crisis energética, cargada de resonancias apocalípticas, ha sido tan sobrecogedora como estimulante. Este químico del Instituto de Tecnología de California sostiene que, para evitar los efectos del calentamiento global, hacia 2050 nuestra civilización debería generar potencias de más de 10 teravatios (1 Tw = 10^{12} vatios) mediante energías "limpias" que no conlleven emisiones carbónicas. Esta cifra triplica con holgura la demanda energética actual de Estados Unidos, cuyo promedio anual ronda los 3,2 Tw. La explotación hidroeléctrica de todos los ríos, lagos y cursos de agua del planeta, señala Lewis, sólo permitiría generar unos 5 Tw. Mediante la energía nuclear sí se podría alcanzar tal objetivo, aunque para ello el mundo debería construir un reactor nuevo cada dos días durante los próximos 50 años.

Antes de que los oyentes caigan en el desánimo, Lewis explica que hay una vía de salvación: cada hora, el sol derrama sobre la tierra más energía de la que toda la humanidad utiliza en un año. Mas, para salvarnos, serán necesarios enormes progresos en las técnicas de producción de combustibles: hojas artificiales que capturen los rayos solares y los conviertan allí mismo en combustibles químicos, como hacen los vegetales. En lugar del petróleo o el gas natural, ese combustible nos servirá para propulsar nuestros automóviles, crear calor o generar electricidad, y podremos almacenarlo para utilizarlo cuando se ponga el sol.

El laboratorio de Lewis figura entre los que intentan crear prototipos de hojas —no mucho mayores que los microcircuitos electrónicos—, concebidos para producir combustibles hidrogenados a partir de agua, en lugar de sintetizar glucosa como las plantas. El hidrógeno, a diferencia de los combustibles fósiles, arde sin generar residuos. Otros investigadores están trabajando en ideas concurrentes con la ambición de capturar la energía del sol, como la modificación genética de algas para que segreguen biocombustible o la creación de organismos nuevos que produzcan petróleo. Todas esas estrategias pretenden convertir la luz solar en energía química que luego se podrá almacenar, transportar y consumir fácilmente. Lewis sostiene, empero, que la hoja artificial es la opción con más posibilidades de producirse industrialmente y satisfacer las necesidades energéticas de nuestra civilización.

Combustibles a partir de fotones

Aunque algunos laboratorios han logrado sintetizar pequeñas cantidades de "combustible solar" (también llamado electrocombustible), aún falta perfeccionar la técnica para producirlo a gran escala y bajo coste. Lewis estima que para abastecer de energía a EE.UU. sería necesario fabricar láminas delgadas y flexibles, en lugar de chips rígidos y separados, con métodos similares a la impresión de periódicos en las rotativas. Esas películas tendrían que ser tan económicas como la moqueta para suelos, y habrían de abarcar una superficie equivalente a la de Castilla-La Mancha.

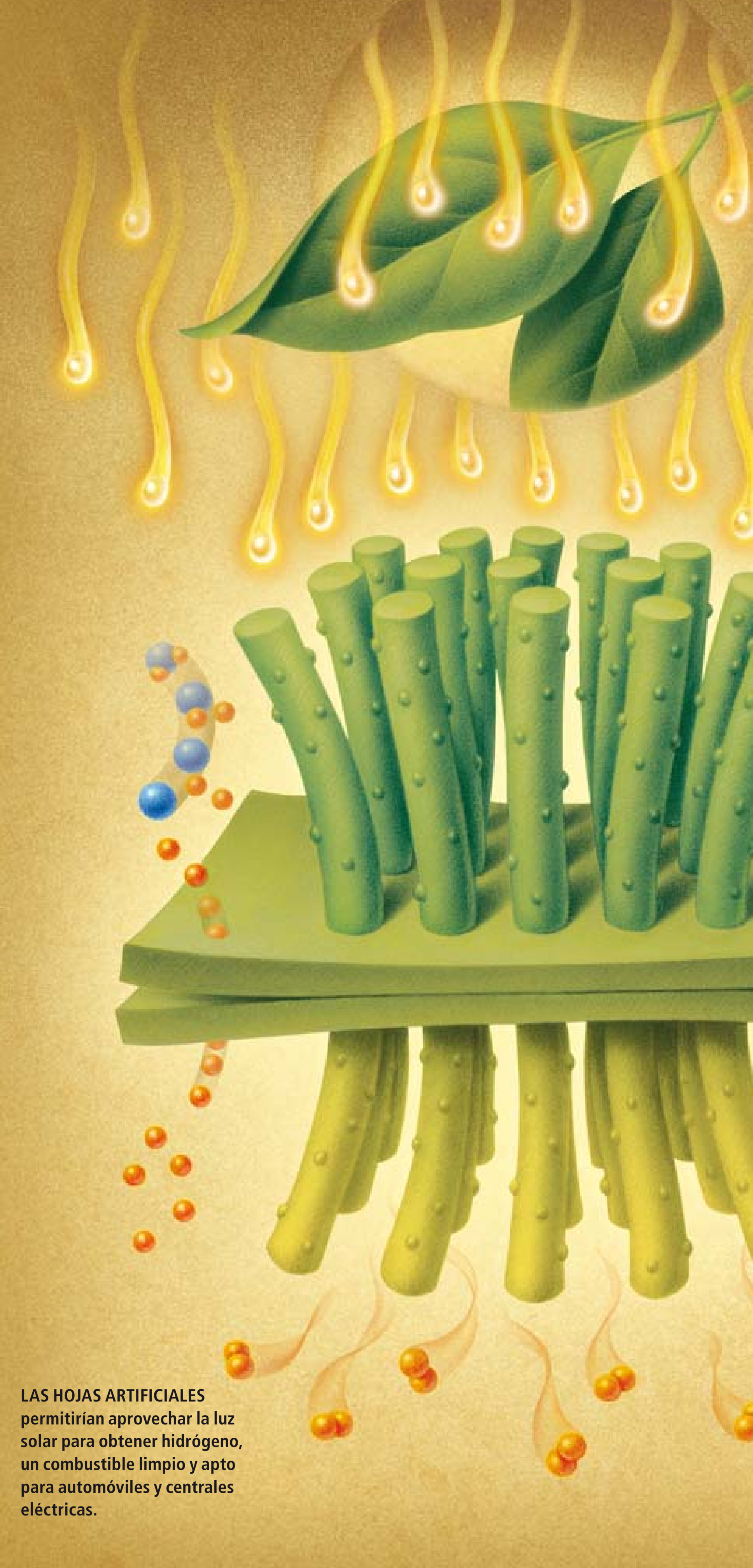
CHERIE SINNEN

Las técnicas para capturar la energía solar, lejos de ser un sueño fantasioso, han ido avanzando a trompicones desde que el presidente Carter alentó la búsqueda de nuevas fuentes de energía ante las crisis petrolíferas de los años setenta. En nuestros días, cuando a las previsiones de penuria energética se suman los problemas del cambio climático, los combustibles solares están mereciendo una renovada atención. Stenbjörn Styring, investigador de la Universidad de Upsala que está desarrollando sistemas artificiales que remedan la fotosíntesis, afirma que el número de consorcios que trabajan en el tema ha pasado de sólo 2 en 2001 a 29 en nuestros días.

El Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) asignó el pasado julio el equivalente a unos 100 millones de euros, distribuidos a lo largo de cinco años, para que un equipo de científicos de diversos laboratorios, encabezados por Lewis, estudiara técnicas que permitieran la obtención de combustibles solares, una de las tres prioridades en investigación energética del departamento. A juicio de Steven E. Koonin, director científico del DOE, los combustibles solares resolverían dos grandes problemas, el abastecimiento energético y las emisiones carbónicas. Koonin considera que los proyectos de conversión directa de energía solar en energía química han de vencer obstáculos prácticos formidables pero, aún así, el esfuerzo vale la pena, porque la recompensa sería enorme.

Durante la fotosíntesis, las hojas de las plantas aprovechan la energía de la luz solar para reorganizar los enlaces químicos del agua y del dióxido de carbono, y producen y almacenan combustible en forma de azúcares. “Deseamos inventar algo que se parezca al máximo a una hoja”, declara Lewis. Es decir, un dispositivo que funcione con la misma sencillez aparente pero dé lugar a productos químicos diferentes. La hoja artificial que Lewis está diseñando requiere dos elementos principales: un colector que convierta energía solar (fotones) en energía eléctrica y un electrolizador que se valga de la energía de los electrones para descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno. A ello debe sumarse un catalizador (un metal o un compuesto químico) que ayude a lograr tal separación. Las fotocélulas existentes ya producen electricidad a partir de la luz solar, y los electrolizadores se utilizan en diversos procesos comerciales; se trata ahora de combinar unos y otros en películas fotoquímicas eficientes y económicas.

Ya se han creado prototipos, aunque demasiado voluminosos, con el único fin de com-



LAS HOJAS ARTIFICIALES permitirían aprovechar la luz solar para obtener hidrógeno, un combustible limpio y apto para automóviles y centrales eléctricas.

FUNCIONAMIENTO

Nanohilos que remedan la naturaleza

Los vegetales se valen de la energía del sol para convertir dióxido de carbono y agua en glucosa, un combustible químico que a continuación consumen o almacenan (*izquierda*). Se están diseñando hojas artificiales que emplean la luz solar para escindir moléculas de agua y obtener hidrógeno combustible. El grupo de Nathan Lewis, en el Instituto de Tecnología de California, está diseñando una pequeña hoja a base de matrices de nanofilamentos de silicio que podría producir hidrógeno (*derecha*).

Hoja vegetal

Hoja artificial

Absorción de energía. Los fotones procedentes del sol son absorbidos por material fotoactivo: en las plantas, por los tilacoides de los cloroplastos; en las matrices artificiales, por nanohilos semiconductores.

Oxidación. La energía de los fotones absorbidos arranca electrones de las moléculas de agua, sea en el cloroplasto o en la matriz, y escinde las moléculas en iones de hidrógeno (H^+) y oxígeno.

Reducción. En las plantas, los iones H^+ se combinan con electrones y dióxido de carbono para formar glucosa en los estromas. En la matriz, los iones H^+ atraviesan una membrana y se combinan con electrones para formar moléculas de hidrógeno.

Formación de combustible. Ambos procesos crean un combustible almacenable y transportable: glucosa en los vegetales, hidrógeno en las matrices.

Cloroplasto
Fotón
Tilacoide
H_2O
e^-
H^+
O_2
Estroma
CO_2
Glucosa
H_2
Hidrógeno
Nanohilo semiconductor
Catalizador de la oxidación
Catalizador de la reducción
Nanohilo semiconductor

CHERIE SINNEN

probar el funcionamiento de tal combinación. Los ingenieros de la compañía automovilística Honda han construido una caja, algo más alta que un refrigerador, cubierta con células fotovoltaicas. En su interior, un electrolizador se vale de la energía solar para descomponer moléculas de agua. La caja libera al ambiente el oxígeno producido y comprime y almacena el hidrógeno restante, que Honda quisiera utilizar para la recarga de automóviles propulsados por células de combustible.

Esa estrategia podría contribuir a resolver el calentamiento global: para generar energía sólo se requiere luz solar y agua, el subproducto de la reacción es oxígeno y el producto de la posterior combustión del hidrógeno en una célula de combustible es agua. El problema reside en el elevado precio del silicio cristalino con el que están formadas las células fotovoltaicas. Y los electrolizadores requieren el metal noble platino, el mejor material disponible para catalizar la descomposición del agua pero cuyo coste actual supera los 40 euros el gramo.

Se deduce entonces que la estación de hidrógeno de Honda no servirá para abastecer de energía al mundo. Lewis calcula que para atender a la demanda mundial de energía, los dispositivos solares deberían costar menos de 10 euros por metro cuadrado de superficie colectora de luz solar y convertir al menos un 10 por ciento de esa energía en combustible químico. Se necesita por tanto una técnica nueva, de aplicación a gran escala, que produzca películas o alfombras de materiales baratos.

Hallar un catalizador

El estudio de la técnica se halla aún en un estadio inicial, a pesar de los decenios dedica-

El autor

Antonio Regalado es redactor de ciencia y tecnología, y corresponsal en América Latina de la revista *Science*. Escribe sobre temas relacionados con la energía, entre ellos, las energías renovables.

dos a la labor, con interrupciones y arranques. Uno de los primeros experimentos permite comprender las dificultades a las que se hace frente. En 1998, John Turner, del Laboratorio de Energía Renovable, en Golden (Colorado), construyó un dispositivo del tamaño de una caja de cerillas que, colocado en agua y expuesto a la luz solar, liberaba oxígeno e hidrógeno a una velocidad prodigiosa y era doce veces más eficiente que una hoja verde. Pero la creación de Turner se basaba en materiales raros y muy caros, entre ellos, un catalizador de platino. Según una estimación, la célula solar de Turner costaría unos 10.000 euros por centímetro cuadrado. Ese precio resultaría aceptable para ciertas aplicaciones militares o espaciales, pero no para suministrar energía a la población.

Los metales nobles, por lo general los mejores catalizadores, son muy escasos. "Ahí radica el problema", explica Styring. "Si queremos salvar el planeta, deberemos prescindir de todos esos metales nobles y trabajar con materiales más baratos, como el hierro, el cobalto o el manganeso". Otra dificultad estriba en la elevada corrosividad de la reacción de electrólisis del agua. Los vegetales resuelven el problema reconstruyendo sin cesar su maquinaria fotosintética. La célula solar de Turner duró tan sólo 20 horas.

En la actualidad, las investigaciones de Turner se centran en la preparación de sucesivas generaciones de catalizadores, cada vez más baratos, y en el diseño de colectores solares, cada vez más duraderos. "Me dedico a pasear por el bosque buscando un material que haga lo que necesito", explica Turner, "pero los progresos han sido mínimos".

Otros equipos están investigando también nuevos catalizadores, como el de Daniel G. Nocera, del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT). En 2008 acertó con una combinación de cobalto y fosfato, de bajo coste, que cataliza la producción de oxígeno, una parte necesaria en la reacción de escisión del agua.

Aunque aquel invento representaba tan sólo una de las piezas del rompecabezas —los investigadores no lograron crear un catalizador mejor para la síntesis de hidrógeno, el combustible de interés—, el MIT lo proclamó como un gran paso hacia la fotosíntesis artificial. Nocera predijo que los estadounidenses no tardarían en fabricar hidrógeno para sus automóviles utilizando equipos de bajo coste instalados en el patio trasero de sus casas. Esas osadas proclamas no han sentado bien a ciertos expertos en fotocombustibles, que mantienen que aún faltan decenios de investigaciones. Otros son más decididos: el DOE y emprendedores de capital-riesgo de Polaris Venture Partners están financiando los actuales trabajos de Nocera en Sun Catalytix, compañía que ha creado en Cambridge, Massachusetts.

En el ínterin, Lewis ha intentado descubrir una forma de recolectar fotones del sol y convertirlos en energía eléctrica —el primer paso de todo dispositivo de producción de combustible solar— que sea más económica que las células fotovoltaicas estándar, de silicio cristalino. Ha diseñado y fabricado un colector formado por nanofilamentos de silicio incrustados en una película de plástico transparente que, en caso de adoptar mayor superficie, se pudiera enrollar y desenrollar como una manta. Los nanofilamentos convierten energía lumínica en eléctrica con un rendimiento del 7 por ciento. Ese valor es muy inferior al de las células fotovoltaicas comerciales, que puede alcanzar un 20 por ciento. Pero si el material se fabricara a un bajo coste y las láminas se obtuvieran de modo parecido a la impresión de periódicos en las rotativas, su menor eficiencia podría resultar aceptable.

Se debate también si el hidrógeno constituye la mejor opción como fotocombustible. Los equipos que trabajan con organismos vivos que sintetizan biocombustibles líquidos afirman que éstos son más fáciles de almacenar y de transportar que el hidrógeno. Pero el hidrógeno también ofrece versatilidad: puede utilizarse en coches propulsados por células de combustible, emplearse para generar electricidad en centrales termoeléctricas e incluso servir como materia prima para la producción de gasóleo sintético. No obstante, "la clave consiste en fabricar un combustible químico de gran densidad energética y mínimas emisiones de carbono", insiste Lewis. "No nos empecinemos en cuál haya de ser".

Las hojas de los vegetales demuestran la posibilidad de convertir luz solar en combustible a partir de compuestos corrientes. ¿Podrá la humanidad imitar este proceso para rescatar al planeta del calentamiento global? No existe un pronóstico claro al respecto. "El hecho mismo de que no podamos resolver el problema con los compuestos disponibles es lo que hace tan apasionante el trabajo en este campo", señala Lewis. Pero le preocupa que la sociedad —en la que incluye a los gobernantes, las agencias de financiación científica y los propios científicos— no se haya percatado todavía de la gravedad del problema energético ni de la necesidad de soluciones revolucionarias. Por ese motivo dedica tiempo a dar charlas y conferencias y a predicar las posibilidades que nos ofrece el sol: "En este problema no podemos permitirnos fracasar, aunque no parecemos muy conscientes de ello".

Para salvar el planeta habrá que prescindir de metales nobles y usar catalizadores baratos, como el hierro

➥ Versión multimedia del artículo original en: **http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=interactive-reinventing-the-leaf**

PARA SABER MAS

POWERING THE PLANET: CHEMICAL CHALLENGES IN SOLAR ENERGY UTILIZATION. Nathan S. Lewis y Daniel G. Nocera en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, n.º 43; págs. 15.729–15.735; 24 de octubre de 2006.

IN SITU FORMATION OF AN OXYGEN–EVOLVING CATALYST IN NEUTRAL WATER CONTAINING PHOSPHATE AND CO^{2+}. Matthew W. Kanan y Daniel G. Nocera en *Science*, vol. 321, págs. 1072–1075; 22 de agosto de 2008.

POWERING THE PLANET WITH SOLAR FUEL. Harry B. Gray en *Nature Chemistry*, vol. 1, n.º 7; abril de 2009.

ENERGY-CONVERSION PROPERTIES OF VAPOR-LIQUID-SOLID-GROWN SILICON WIRE-ARRAY PHOTOCATHODES. Shannon W. Boettcher et al. en *Science*, vol. 327, págs. 185-187; 8 de enero de 2010.

Los dinosaurios también nadaban

Un rastro fósil hallado en La Rioja revela la forma de natación de ciertos dinosaurios terópodos no avianos y arroja luz sobre una de las cuestiones etológicas más apasionantes de estos reptiles

Rubén Ezquerra Miguel, Loïc Costeur, Félix Pérez-Lorente

CONCEPTOS BASICOS

- El estudio de un excepcional rastro fósil hallado en Enciso, La Rioja, demuestra que ciertos dinosaurios terópodos no avianos desarrollaron una locomoción eficaz en el medio acuático. Las huellas se encuentran sobre un estrato de arenisca del Cretácico inferior, hace unos 125 millones de años.
- El dinosaurio rascó el fondo dejando sobre el sedimento nueve conjuntos asimétricos de dos o tres arañazos. Las rizaduras de oleaje indican que el animal nadó bajo la influencia de una corriente.
- El descubrimiento permite ahondar en la etología y la locomoción de estos reptiles, así como en aspectos ecológicos como la dieta y el modo de vida semiacuático que quizá les permitió colonizar los nichos ecológicos acuáticos.

En 1980, el paleontólogo Walter P. Coombs descubrió en el Jurásico inferior de Conneticut un rastro curioso. Las huellas fueron descritas como un morfotipo muy original y totalmente diferente de lo que se había encontrado hasta la fecha. Fue la primera vez que se hallaba una huella fosilizada (icnita) con la impresión distal de los tres dedos; las impresiones mostraban una forma elongada, de acanaladura, como si el animal hubiera arañado el sustrato por el cual se desplazaba. Dicha pista, publicada en *Science*, se atribuyó a los efectos de la natación de un dinosaurio terópodo no aviano.

Sin embargo en 2003, James O. Farlow y Peter M. Galton estudiaron de nuevo dichas huellas y llegaron a una conclusión totalmente opuesta: el rastro había sido producido mientras el dinosaurio se desplazaba sobre una superficie de sedimento de consistencia dura, por tanto, en tierra firme.

Asimismo, un rastro del Jurásico medio de Inglaterra descrito en 2001 por Martin A. Whyte y Mike Romano, y unas huellas aisladas del Jurásico inferior de Polonia publicadas por Gerard Gierlinsky en 2004 fueron denominadas *Characichnos tridactylus* y se atribuyeron a terópodos no avianos nadadores. En 2006, Andrew R. C. Milner, Martin G. Lockley y James I. Kirkland describieron en el Jurásico inferior de Utah un gran número de huellas de natación aisladas. Se correlacionaron con huellas de los ichnogéneros Grallator y Eubrontes, ambos relacionados con dinosaurios terópodos no avianos.

Con todo, en los ejemplos anteriores las icnitas aparecían aisladas o asociadas a rastros muy pequeños, por lo que su atribución a huellas de natación no convenció a los expertos.



ALBERT MARÍN, BASADO EN UNA ILUSTRACIÓN DE GUILLAUME SUAN, DE LA UNIVERSIDAD DE GOETHE, FRANKFURT

1. ¿NADABAN LOS DINOSAURIOS **terópodos no avianos? El examen minucioso de un rastro fósil hallado en La Rioja demuestra que sí.**



2. LA CUENCA DE CAMEROS se ubica en las provincias de Burgos, Soria y La Rioja. Es la más occidental de un conjunto de cuencas del sistema de rift ibérico Mesozoico, que se crearon durante el Jurásico superior y el Cretácico inferior, mientras la península Ibérica se separaba del sur de Francia y se abría el golfo de Vizcaya (*arriba*). La cuenca de Cameros se caracteriza por un gran espesor de sedimentos continentales: lacustres y fluviales (alcanzan los 5000 metros verticales). El relleno sedimentario consta de cinco grupos geológicos: Tera, Oncala, Urbión, Enciso y Oliván. El pueblo riojano de Enciso dio nombre al Grupo Enciso, datado del Barremiense superior-Aptiense. Tras una agitada historia tectónica, dicho grupo aflora hoy en el paisaje semiárido de La Rioja, dejando expuestos a la vista un gran número de yacimientos de huellas fósiles de dinosaurio, como el de la Virgen del Campo 4 (*fotografía*).

CORTESIA DE LOS AUTORES

Una pista en las orillas de un lago Cretácico

El debate sobre la capacidad de los dinosaurios terópodos no avianos para desarrollar una locomoción acuática siguió abierto hasta el descubrimiento, en 2003, de un rastro muy particular en el yacimiento riojano de La Virgen del Campo 4. Dicho yacimiento se encuentra en la cuenca geológica de Cameros; de roca arenisca, pertenece al Grupo Enciso datado del Barremiense superior-Aptiense (Crétacico inferior, hace unos 125 millones de años). Fue preservado por un delta que progresaba hacia el margen sur de un enorme lago perenne que se extendía en tal cuenca.

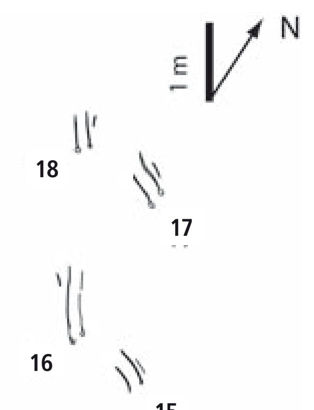
En La Rioja, los huesos fósiles son escasísimos. Sin embargo, por mediación de la Fundación Patrimonio Paleontológico de La Rioja, se han catalogado ya cerca de 10.000 huellas, cuyo estado de conservación es por lo general excepcional. Estas huellas pertenecen a Ornitópodos, Saurópodos y, sobre todo, a Terópodos [*Véase* "Icnitas de la Rioja", por José-Vicente Santafé y M. Lourdes Casanovas; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1995].

Desde 1998 se conocía la existencia, en los cuatro yacimientos de La Virgen del Campo, de algunas huellas enigmáticas aisladas. Muchas eran de deslizamiento; otras, señales de uñas. Tales indicios llevaron a nuestro equipo a efectuar varias campañas de prospección de

huellas acuáticas de vertebrados en La Rioja. El resultado no pudo ser más fructífero. Se descubrieron icnitas de natación en dos yacimientos excepcionales: en 2002 y 2003 en La Virgen del Campo 4 y en 2005 cerca de San Vicente de Robres. En este último se hallaron sólo huellas de peces.

En el yacimiento de La Virgen del Campo 4 se encontraron, en un principio, varias icnitas aisladas correspondientes a uñadas de dinosaurios terópodos no avianos, y dos rastros de cocodrilos, que nadaron a ras del sedimento. Fue durante la campaña de 2003 cuando se descubrió, en un estrato cuya superficie presentaba rizaduras de oleaje, un peculiar rastro casi rectilíneo, de doce huellas consecutivas, que se extendía a lo largo de quince metros. Las huellas cortaban las rizaduras de oleaje, lo cual implicaba que el paso del animal había sido posterior a la formación de éstas.

Dado que el yacimiento prometía más huellas, se realizaron dos nuevas campañas: una en otoño de 2009 y otra en el verano de 2010.



RASTRO DE NATACION

En 2003 se halló en el yacimiento riojano de La Virgen del Campo 4 (del Crétacico inferior, hace unos 125 millones de años), un rastro fósil que arroja luz sobre el debate sobre la capacidad de los dinosaurios terópodos no avianos para desarrollar una locomoción acuática: el rastro de un dinosaurio que nadaba en dirección noroeste.

La superficie del estrato presenta rizaduras de oleaje y un peculiar rastro casi rectilíneo, de 18 huellas (icnitas) consecutivas, que se extiende a lo largo de 22 metros. Las huellas cortan las rizaduras, lo que indica que el paso del animal fue posterior a la formación de éstas.

Las 18 huellas se reúnen en 9 conjuntos asimétricos de dos o tres arañazos. Los números romanos corresponden a las uñadas producidas por los dedos II, III y IV. En algunas huellas izquierdas, como en la n.º 6 por ejemplo, y en todas las huellas derechas, la uñada producida por el dedo III es la más larga y profunda, y la distancia entre las uñadas de los dedos II y III es mayor que la separación entre las uñadas III y IV, formando una uve. Estos rasgos son característicos también de las icnitas de terópodos hechas en suelo firme. Las huellas del pie izquierdo difieren de las del derecho en cuanto a la forma y la zancada.

AUTOPODO POSTERIOR (PIE) IZQUIERDO

Grupos de dos o tres arañazos paralelos y poco sinusoidales.

Huellas paralelas a la dirección del rastro.

La más pequeña mide 14 cm; la mayor, 90.

Zancada media: 254 cm.



AUTOPODO POSTERIOR (PIE) DERECHO

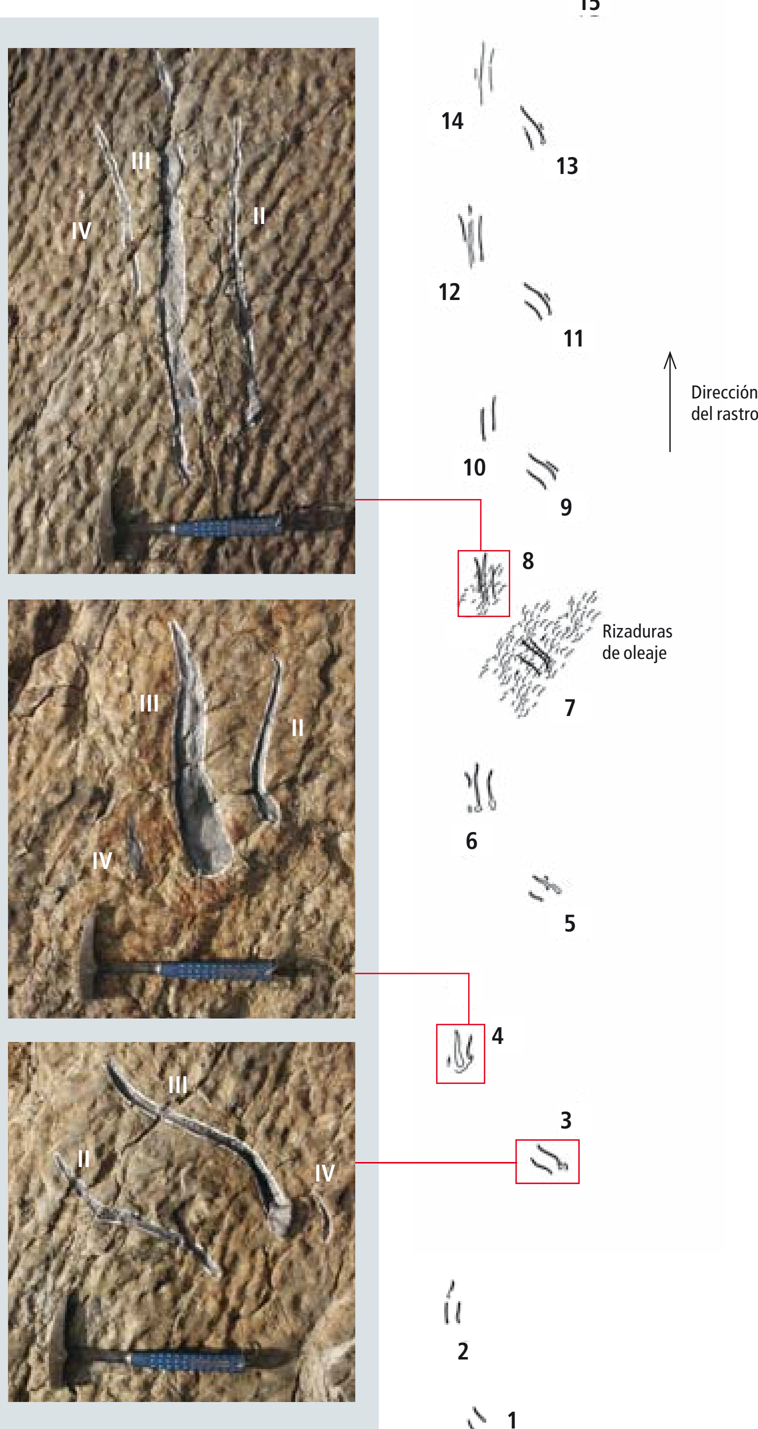
Grupos de dos o tres arañazos paralelos y sinusoidales.

Las huellas forman un ángulo de 40º con la dirección del rastro.

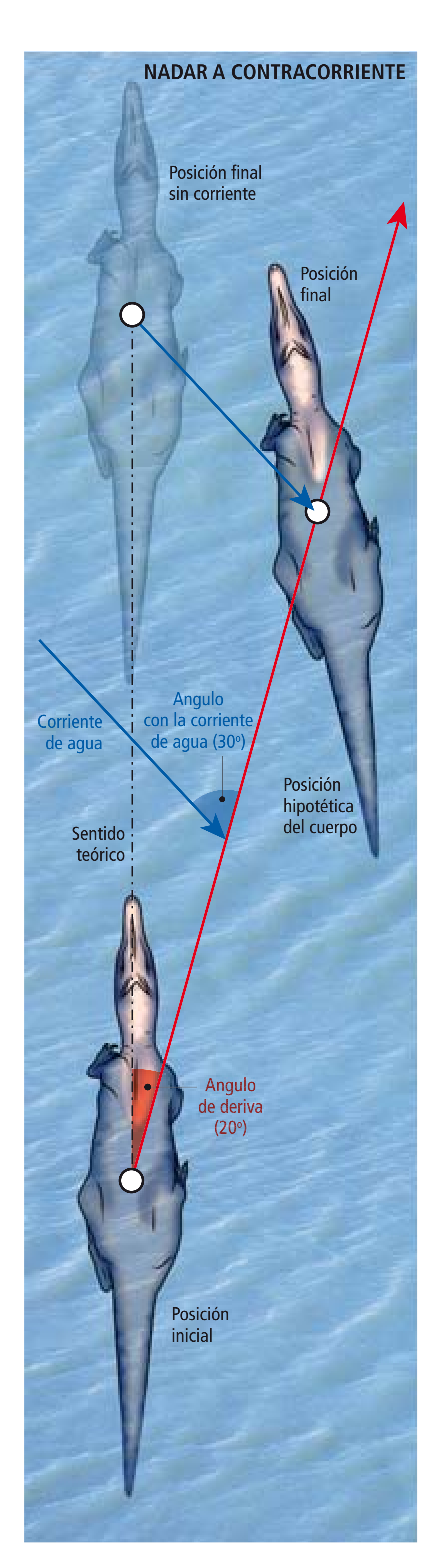
La más pequeña mide 8 cm; la mayor, 56,5.

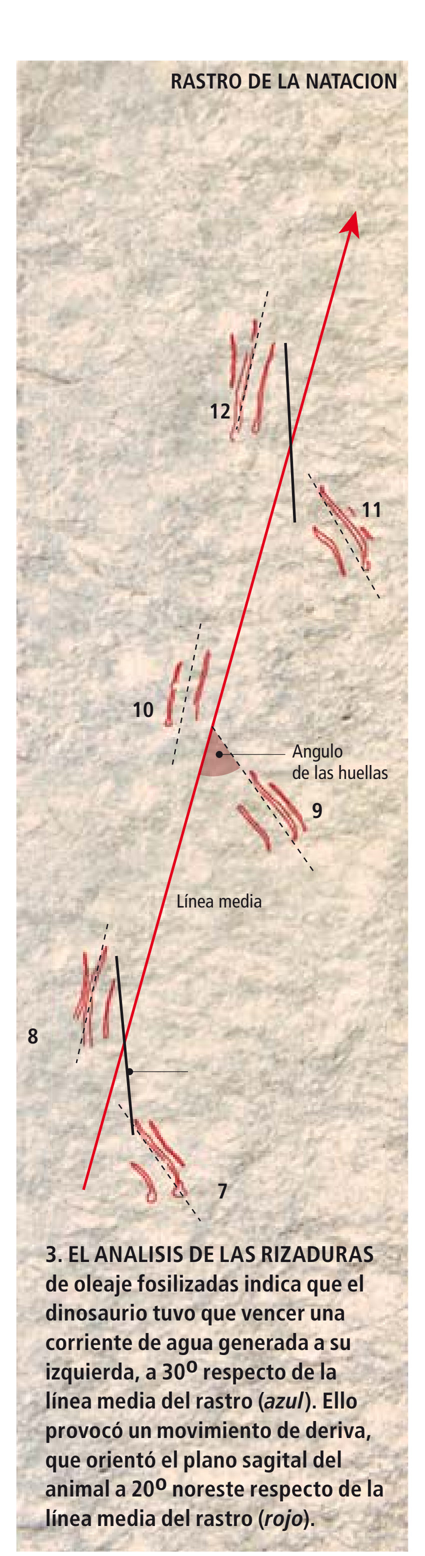
Zancada media: 265 cm.





CORTESIA DE LOS AUTORES





3. EL ANALISIS DE LAS RIZADURAS de oleaje fosilizadas indica que el dinosaurio tuvo que vencer una corriente de agua generada a su izquierda, a 30º respecto de la línea media del rastro (*azul*). Ello provocó un movimiento de deriva, que orientó el plano sagital del animal a 20º noreste respecto de la línea media del rastro (*rojo*).

Gracias a estas excavaciones, han salido a la luz seis nuevas icnitas que han incrementado la longitud del rastro en más de un 30 por ciento (ha pasado de 15 a 22 metros).

Las dieciocho huellas se reúnen en nueve conjuntos asimétricos de dos o tres arañazos. Varias icnitas presentan un montoncito de barro en su parte más trasera. La forma y zancada de las huellas del pie izquierdo difieren de las del pie derecho.

Un dinosaurio nadador

La forma de las icnitas, su disposición en el rastro y el contexto sedimentario refuerzan la idea de que el autor de las mismas fue un gran reptil, que durante su natación rascó con las uñas la superficie del sedimento.

Entre los grandes vertebrados del Cretácico inferior figuran los cocodrilos, las tortugas y los dinosaurios. Las huellas fósiles de natación de cocodrilos son más pequeñas, anchas y menos afiladas que las otras. Aparecen agrupadas en conjuntos de tres o cuatro incisiones, que pueden corresponder a manos o a pies. En ocasiones, el vientre deja marcas en el sedimento. El estudio de sus rastros sugiere una locomoción acuática asegurada por la cola: ésta actuaba a modo de propulsor axial, mientras que los miembros se movían sólo para estabilizar o maniobrar. El rastro que centra nuestra investigación no coincide con esta descripción, por lo que no puede atribuirse a un cocodrilo.

En cuanto a las huellas fósiles de natación de tortugas, el yacimiento más espectacular es el de Cerin, en la región francesa del Ain. Las icnitas, creadas principalmente por las aletas anteriores, constan de dos o tres incisiones muy juntas; algunas conservan las huellas de las membranas. Estos reptiles pueden generar varios tipos de marcas, en función del contacto de las aletas (anteriores y posteriores, con el sustrato), la batimetría o el comportamiento del animal. El movimiento de los miembros puede ser alternado o sincrónico, en cuyo caso se generan huellas simétricas. Este tipo de huellas tampoco coincide con las icnitas halladas en La Virgen del Campo 4.

Los dinosaurios se clasifican en Ornitisquios y Saurisquios, según la disposición de sus huesos de la cadera: ilion, isquion y pubis. De esta manera, encontramos en los Ornitisquios (cadera de ave) el pubis dispuesto hacia atrás, paralelamente al isquion; en los Saurisquios (cadera de reptil), el pubis se orienta hacia adelante y el isquion hacia atrás. Entre los Saurisquios hallamos a los Terópodos, dinosaurios bien representados desde el Triásico medio (hace 240 millones de años) hasta el Cretácico superior (hace 65 millones de años). De ellos proceden las aves actuales. De ahí que se distinga entre terópodos no avianos y terópodos que comparten características comunes con las aves. El término terópodo fue propuesto por el Othniel Charles Marsh en 1881: significa pie de bestia.

En el Cretácico inferior de Burgos, Castellón, Cuenca, La Rioja, Teruel y Valencia se han encontrado numerosos restos óseos de terópodos, sobre todo dientes, a partir de los

CORTESIA DE LOS AUTORES

¿COMO SE FORMAN LAS HUELLAS?

El suelo que pisaron los dinosaurios ha desempeñado un papel fundamental en la preservación de sus huellas. Los terrenos que mejor permiten reproducir las características anatómicas de las manos o pies de estos reptiles son los sedimentos arcillosos firmes, compactados y con elevada plasticidad. Este es el caso de los yacimientos riojanos (formados en los márgenes de antiguos lagos y pantanos) y asturianos (que se formaron en una antigua llanura aluvial y en una zona litoral con deltas).

Las huellas actúan como huecos en el sustrato que van siendo rellenados posteriormente por nuevas capas de sedimentos. Si el material de relleno es de la misma composición que el precedente, es muy difícil que la icnita quede preservada. Además, se requiere que el sedimento tenga un cierto contenido en agua, pero siempre por debajo de un umbral (una hidratación excesiva produce texturas similares a la de un puré, por lo que no permite el registro de las pisadas). Las mejores condiciones para la fosilización de las mismas tienen lugar cuando el sedimento que pisa el dinosaurio y el nuevo sedimento que rellena luego el hueco creado al hollar tienen diferente composición. Por ejemplo, cuando el reptil camina sobre barro y éste queda luego cubierto por arena, o a la inversa, cuando lo hace sobre un banco arenoso que luego es recubierto por arcilla.

Las huellas conservadas en forma de huecos o depresiones en la superficie superior de los estratos se denominan moldes o huellas verdaderas; los rellenos de estos huecos, que suelen aparecer en forma de abultamientos en las bases de estratos de arenisca o caliza, se conocen como contramoldes. El dinosaurio, al pisar, deforma a menudo los sedimentos subyacentes, creando subhuellas; éstas presentan contornos más difusos y muestran con menor detalle la anatomía del pie o mano del dinosaurio.



1. PISADA
El dinosaurio pisa el suelo y deja una huella.



2. RECUBRIMIENTO Y ENTERRAMIENTO
A lo largo de millones de años, la superficie del sedimento que pisó el dinosaurio queda cubierta por nuevos sedimentos hasta quedar enterrada a gran profundidad.



3. COMPACTACION
El terreno sufre un proceso gradual de deshidratación. Las presiones y temperaturas cada vez mayores transforman poco a poco el sedimento blando en otro más compacto y, por fin, en una roca sólida.



4. ASCENSO Y EXPOSICION
Los intensos esfuerzos tectónicos que tienen lugar en el interior de la Tierra producen un ascenso e inclinación de los materiales mediante pliegues y fallas. La lenta erosión posterior hace que algunas de las rocas antes profundamente enterradas asomen hoy día a la superficie.



CORTESIA DE J. C. GARCIA-RAMOS Y LAURA PIÑUELA, DEL MUSEO JURASICO DE ASTURIAS

cuales se ha constatado una gran variedad de talla entre estos dinosaurios. Eran dinosaurios bípedos: se desplazaban mediante las extremidades posteriores y utilizaban las anteriores para sujetar a las presas. Los pies tenían cuatro dedos con garras afiladas. Tres de ellos (II, III y IV) se apoyaban en el suelo durante la locomoción; el restante (I) quedaba situado en una posición superior, a modo de espolón. Los terópodos eran sobre todo carnívoros, provistos de dientes puntiagudos de bordes aserrados para desgarrar a sus presas. También los había carnívoros y herbívoros (*Pelecanimimus*, del Cretácico inferior de Las Hoyas, en Cuenca) y piscívoros (*Baryonyx*, hallado en Salas de los Infantes, en Burgos, y en los pueblos riojanos de Igea y Enciso).

Los zambos nadaban mejor

El rastro hallado en el yacimiento de la Virgen del Campo 4 presenta dos aspectos singulares y originales. Por un lado, la diferencia de formas entre las huellas del autopodo posterior (pie) izquierdo y las del derecho. Por otro, las icnitas de la derecha forman un ángulo de 40º con la línea media del rastro.

Estas particularidades se deben a la combinación de dos factores: el tipo de natación adoptado por el dinosaurio y el medio en que éste nadaba, es decir, una corriente de agua.

Los conjuntos de uñadas alternados implican que el animal usó un modo discontinuo de propulsión, derivado de un movimiento alternado de sus dos extremidades posteriores, es decir, un movimiento pélvico de remos al modo de las aves acuáticas actuales de pies palmeados. En este modo de natación, el movimiento vertical de las extremidades se articula en un plano parasagital (paralelo al plano de simetría bilateral), con una fase de propulsión (extensión) y otra de recobro (flexión). Este tipo de natación requiere una articulación de tobillo avanzada, la cual está presente en los dinosaurios.

Para limitar las resistencias debidas al agua, a un coste energético mínimo, el animal adopta un movimiento sinusoidal de los pies, orientándolos al mismo tiempo hacia el interior de la pista, es decir, como en el andar zambo. No obstante, las huellas izquierdas presentan una trayectoria más rectilínea que las derechas.

Los autores

Rubén Ezquerra Miguel es investigador del Instituto de Estudios Riojanos y miembro de la Fundación Patrimonio Paleontológico de La Rioja. Es paleontólogo por la Universidad de Lyon y especialista en huellas fósiles de dinosaurios, tortugas, peces y cocodrilos del Mesozoico español y francés. Centra su investigación en la locomoción acuática de los vertebrados del Cretácico inferior de La Rioja. **Loïc Costeur** es conservador de la sección de paleontología del Museo de Historia Natural de Basilea. Se dedica al estudio de la paleoecología de los mamíferos continentales del Neógeno de Europa, así como a la icnología de mamíferos, peces y dinosaurios. **Félix Pérez Lorente** es profesor de geología en la Universidad de La Rioja y director del Centro Paleontológico de Enciso. Es experto en huellas de vertebrados del Mesozoico y Terciario español.



4. EL RASTRO de doce huellas fósiles de dinosaurio hallado en 2003, se amplió en 2009 y 2010 con el descubrimiento de seis nuevas icnitas.

La trayectoria sinusoidal de las huellas derechas aumenta la masa de agua movilizada por el pie. Ello permite obtener el mejor movimiento hidrodinámico posible y aumentar el tiempo de empuje, una ventaja para una natación de ritmo medio y económica.

En resumen, el miembro posterior derecho transmite una mayor potencia biomecánica. Al ser el propulsor principal, las zancadas derechas son más grandes que las izquierdas. El número de dedos impresos, ya sean de las huellas izquierdas o derechas, depende del grado de inclinación o del ángulo de ataque del pie respecto al sustrato. De este modo, a veces son sólo los dedos más grandes los que arañan el sedimento.

Que las huellas derechas presenten una orientación de 40º puede explicarse si suponemos que el eje del cuerpo (plano sagital del animal) era simétrico a ambos autopodos (región más distante de la extremidad) posteriores. En esta situación, el dinosaurio emplazaría ambos pies con una rotación interna de 20º.

Con la colaboración de Stéphan Doublet, sedimentólogo de la Universidad de Dijon, se analizaron las rizaduras de oleaje fosilizadas. Se estimó a partir de éstas una profundidad máxima de 3,2 metros. Asimismo, se dedujo que el dinosaurio se vio confrontado a una corriente de agua que se generaba a su izquierda, concretamente a 30º respecto de la línea media del rastro. Esta corriente provocó en el dinosaurio un movimiento de deriva, que orientó su plano sagital a 20º noreste respecto a la línea media del rastro.

La mayor utilización de su extremidad posterior derecha en la locomoción, sumada a una ligera orientación del cuerpo del animal hacia la izquierda de la línea media del rastro constituyen la respuesta a la acción de una corriente de agua para conseguir avanzar de una manera prácticamente rectilínea.

Tras un debate científico de tres decenios, la cuestión sobre el grado de eficiencia en la locomoción acuática de ciertos dinosaurios terópodos no avianos ha hallado respuesta en La Rioja.

Gracias a este descubrimiento icnológico, podremos ahora imaginar el modo en que un dinosaurio nadó hace 125 millones de años en un lago de La Rioja, casi a contracorriente y a una profundidad de tres metros, moviendo las extremidades posteriores a la manera de las aves acuáticas actuales.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, la paleoicnología (ciencia que estudia las huellas fósiles) no permite atribuir un rastro a un dinosaurio en concreto sino establecer una relación taxonómica a nivel de familia. En nuestro caso, el autor de las huellas pertenecería a la familia de los terópodos no avianos.

Los espinosaurios se caracterizan, entre otros aspectos, por unas mandíbulas similares a las de los cocodrilos. En La Rioja se han encontrado restos de un espinosaurio llamado *Baryonyx*. Puesto que algunos estudios indican que los espinosaurios incluían peces en su dieta y presentaban un posible vínculo con un modo de vida semiacuático, el autor de las huellas del yacimiento de La Virgen del Campo 4 podría haber sido un espinosaurio.

Este rastro constituye la primera prueba directa de la capacidad de algunos dinosaurios terópodos no avianos para nadar de forma eficaz. Nos ofrece una excelente oportunidad para ahondar en su locomoción, fisiología y el tipo de relaciones que establecieron con el resto de los dinosaurios terrestres y vertebrados acuáticos, así como el régimen de alimentación y el modo de vida semiacuático. El hecho de haber optado por este estilo de vida, lo mismo que hipopótamos y cocodrilos, les habría permitido regular su temperatura corporal o reducir la competición con otros dinosaurios terrestres por los mismos recursos naturales: alimentos y territorio.

Agradecimientos a la Consejería de Cultura del Gobierno de La Rioja, al Instituto de Estudios Riojanos y a la Fundación Patrimonio Paleontológico de La Rioja.

PARA SABER MAS

SWIMMING ABILITY OF CARNIVOROUS DINOSAURS. W. P. Coombs en *Science*, vol. 207, págs. 1198-1200; 1980.

DINOSAUR TRACKWAYS OF DINOSAUR STATE PARK, ROCKY HILL, CONNECTICUT, IN LE TOURNEAU. J. O. Farlow y P. M. Galton en *The great rift valleys of Pangea in eastern North America*, dirigido por P. M. y P. E. Olsen, vol. 2, págs. 248-263; New York Columbia University Press, 2003.

REPTILES NADADORES EN EL SECTOR OESTE DEL YACIMIENTO DE LA VIRGEN DEL CAMPO (4LVC, ENCISO, LA RIOJA, ESPAÑA). R. Ezquerra y F. Pérez-Lorente en *Dinosaurios y otros reptiles mesozoicos en España*. Coordinador F. Pérez-Lorente. Colección Ciencias de la Tierra 26, págs. 215-224; Instituto de Estudios Riojanos, 2003.

WERE NON-AVIAN THEROPOD DINOSAURS ABLE TO SWIM? SUPPORTIVE EVIDENCE FROM AN EARLY CRETACEOUS TRACKWAY, CAMEROS BASIN (LA RIOJA, SPAIN). R. Ezquerra, S. Doublet, L. Costeur, P. Galton y F. Pérez-Lorente en *Geology*, vol. 35, n.º 6, págs. 507-510; 2007.

Poliedros y átomos

Aunque se tratan sólo de una aproximación, los modelos de átomos e iones basados en esferas sólidas explican numerosas propiedades de algunas estructuras cristalinas

Norbert Treitz

En la columna del pasado mes de mayo, estudiamos las propiedades de las espumas formadas por octaedros truncados y otros poliedros. En el número de septiembre hablamos sobre la distribución espacial de los átomos en un cristal. En ambos análisis desempeñaban una función importante los poliedros que rellenan el espacio; esto es, aquellos que pueden apilarse de manera tal que ocupen completamente el espacio tridimensional, sin solaparse ni dejar huecos. En este número procederemos a elaborar algo más esta idea.

Un poliedro que rellena el espacio puede adoptar formas muy exóticas. Pero, si debe encerrar a un átomo y definir las fronteras con sus semejantes en un cristal, las variedades posibles son, en esencia, cinco: las denominadas celdas de Wigner-Seitz (*véase la figura 2*).

Sumas de cuadrados perfectos

Un octaedro truncado de arista unidad exhibe una propiedad más que curiosa: las posibles distancias entre dos de sus vértices son los números de la forma $\sqrt{n}$, donde n toma todos los valores enteros comprendidos entre 1 y 10. Eso nos hace preguntarnos si, en una red de octaedros truncados que llena el espacio, dicha tendencia prosigue de manera indefinida. ¿Aparecen todos los números naturales entre los cuadrados de las distancias entre los vértices (medidas en unidades de la longitud de la arista) de la espuma de Kelvin?

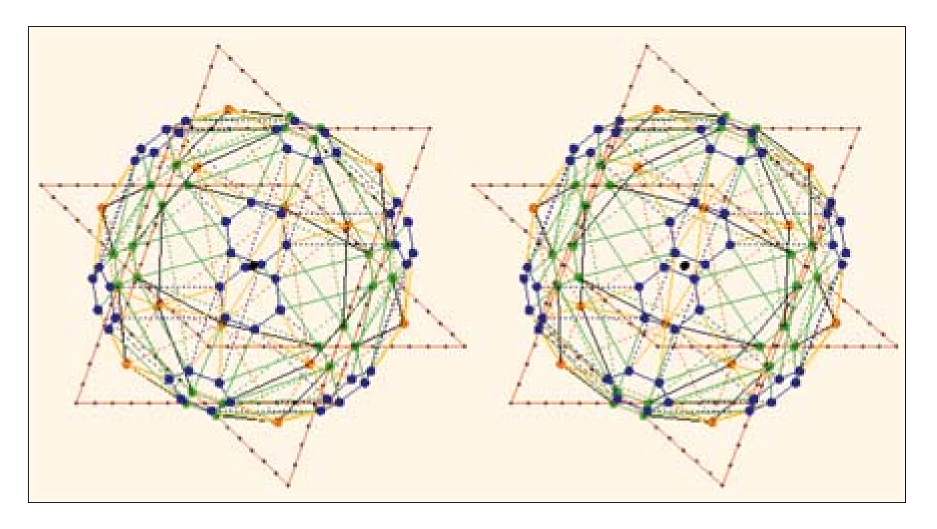
La pregunta se torna algo más sencilla si consideramos una red cúbica elemental: la formada por todos los puntos del espacio cuyas coordenadas (en coordenadas cartesianas) vienen dadas por números enteros. Dados dos puntos cualesquiera, si las diferencias entre sus coordenadas cartesianas vienen dadas por las cantidades Δx, Δy y Δz, el cuadrado de la distancia que los separa, $Z = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$ es siempre un número entero y positivo. Así pues, en una red infinita, ¿toma Z el valor de todos los números naturales, o sólo el de algunos?

Formulemos la cuestión para redes en varias dimensiones. En la "red unidimensional" formada por un número infinito de átomos dispuestos a lo largo de una línea, los cuadrados de las distancias entre dos nodos son simplemente todos los cuadrados perfectos. Y, entre los números naturales, los cuadrados perfectos escasean bastante: en el primer millón, por ejemplo, sólo se incluyen un millar de cuadrados perfectos. Para números mayores, la proporción decrece cada vez más.

¿Qué sucede en dos dimensiones? Una cuadrícula de n^2 casillas cuenta con $(n+1)^2$ nodos. El cuadrado de la distancia entre dos de ellos alcanza un valor máximo de $2n^2$ (entre los dos extremos de una diagonal). En una red de gran tamaño, unos $\pi n^2/4$ nodos se encuentran en el interior del cuarto de círculo de radio n, por lo que el cuadrado de la distancia entre dos de ellos es siempre inferior a n^2. Cada uno de esos números aparece al menos dos veces (por reflexión en las diagonales), por lo que, de entre todos los números hasta n^2, hay como máximo una proporción de $\pi/8 \approx 39{,}27$ por ciento que pueda escribirse como suma de dos cuadrados perfectos. Para valores grandes de n, la tasa disminuye aún más, ya que números como 25 ($= 0^2 + 5^2 = 3^2 + 4^2$) admiten varias descomposiciones.

Un teorema muy poco conocido de Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) establece que cualquier número entero puede escribirse como una suma de cuatro números cuadrados (si se permiten ceros y repeticiones). Por tanto, en una "red hipercúbica" de cuatro dimensiones, todos los números naturales aparecerían como cuadrados de distancias. Pero ¿qué es lo que sucede en tres dimensiones?

Al respecto, Adrien-Marie Legendre (1752-1833) demostró que la proporción de números menores que N que podían escribirse como suma de tres cuadrados perfectos tiende hacia 5/6 cuando N tiende a infinito. Los números para los que algo así no puede hacerse son, en primer lugar, todos aque-



1. LOS 84 NODOS cuyo cuadrado de la distancia al origen es igual a 50 forman la unión de un cuboctaedro (*naranja*), un octaedro truncado (*verde*) y un "gran" (no arquimediano) rombicuboctaedro (*azul*). En la imagen estereográfica, las líneas de trazo continuo marcan la corteza convexa de estos tres cuerpos. Las aristas interiores a dicha corteza se indican mediante líneas discontinuas.

NORBER TREITZ

llos cuya división entre 8 arroja un resto igual a 7: 7, 15, 23, 31, etc. Es decir, cada octavo número natural. ¿Por qué? Al dividir entre 8, los cuadrados de los números pares dan como resto 0 o 4; los cuadrados de los impares, resto 1. Tres de tales restos nunca sumarán 7. A eso hay que añadir los productos de esos números y las potencias de 4, lo que incrementa la proporción de casos negativos en un factor de $(1 + 1/4 + 1/16 + 1/64 + \cdots)$. Ello resulta en una proporción de $4/3 \times 1/8 = 1/6$ de casos negativos, con lo que recuperamos el resultado que enunciábamos arriba. Por ejemplo, ninguna distancia al cuadrado podrá valer 28.

Poliedros y vecinos del mismo orden

En la red cúbica, cada nodo cuenta con seis primeros vecinos; éstos conforman las esquinas de un octaedro regular. Los segundos vecinos dan lugar a las doce esquinas del cuboctaedro de Arquímedes, y los terceros, a las ocho esquinas de un cubo.

En general, para cada grado de vecinos existe una distancia al cuadrado entera y un poliedro con las mismas simetrías que el cubo o el octaedro. Como acabamos de ver, algunos números (7, 15, 23, 28, 31,...) no aparecen nunca como cuadrados de distancias.

Otros se consiguen a partir de combinaciones diversas. El primer ejemplo es $9 = 0^2 + 0^2 + 3^2 = 1^2 + 2^2 + 2^2$. El poliedro correspondiente es la unión de un octaedro regular y un cubo truncado (no arquimediano), circunscritos en una esfera común de radio 3.

Un ejemplo menos evidente: sobre la esfera de radio $\sqrt{1001}$ en torno a un nodo de la red yacen 480 puntos, que se distribuyen sobre diez rombicuboctaedros "grandes" (no arquimedianos). Las 48 coordenadas de uno de ellos vienen dadas por (±1, ±10, ±30), (±10, ±30, ±1), (±30, ±1, ±10), (±1, ±30, ±10), (±30, ±10, ±1) y (±10, ±1, ±30). Las otras nueve posibles descomposiciones de 1001 como suma de tres cuadrados perfectos pueden calcularse a modo de ejercicio con un ordenador.

En general, una descomposición $Z = a^2 + b^2 + c^2$ resulta en 48 nodos cuya distancia al cuadrado desde el origen sea Z para a, b y c diferentes entre sí y distintos de cero. Ello se debe a que tres números distintos pueden ordenarse de tres maneras, más la elección de signo para cada uno de ellos. Si dos números son iguales, entonces restan tres posibilidades (y, por tanto, tres puntos) por octante, lo que resulta en 24 esquinas cuando ninguna coordenada es nula. Para tres valores iguales, se obtienen las ocho esquinas del cubo.

Si permitimos que haya ceros, algunos puntos pertenecerán a la frontera entre dos octantes. Los casos posibles son los siguientes (con $0 < a < b < c$):

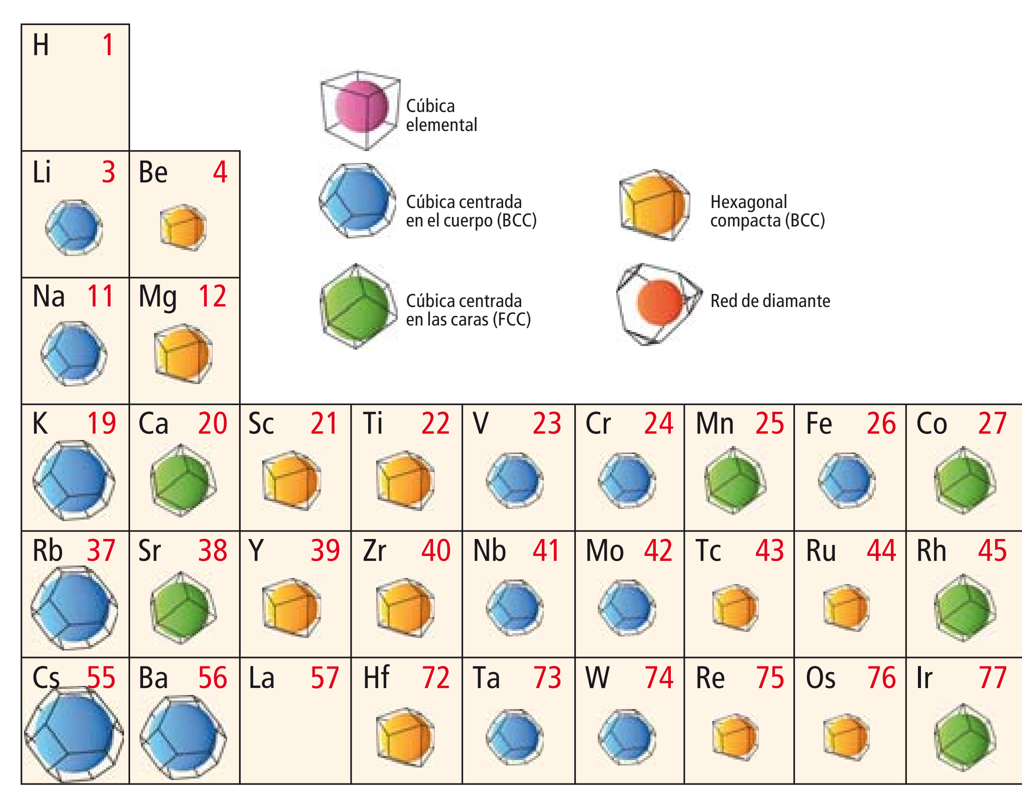
- 0, 0, a: octaedro regular, 6 vértices;
- 0, a, a: cuboctaedro de Arquímedes, 12 vértices;
- 0, a, b: octaedro truncado, 24 vértices (de Arquímedes para $a = b/2$);
- a, b, b: cubo truncado, 24 vértices;
- a, a, b: rombicuboctaedro "pequeño" (de Arquímedes), 24 vértices;
- a, a, a: cubo, 8 vértices;
- a, b, c: rombicuboctaedro "grande" (no arquimediano), 48 vértices.

La figura 1 muestra el caso para $Z = 50$.

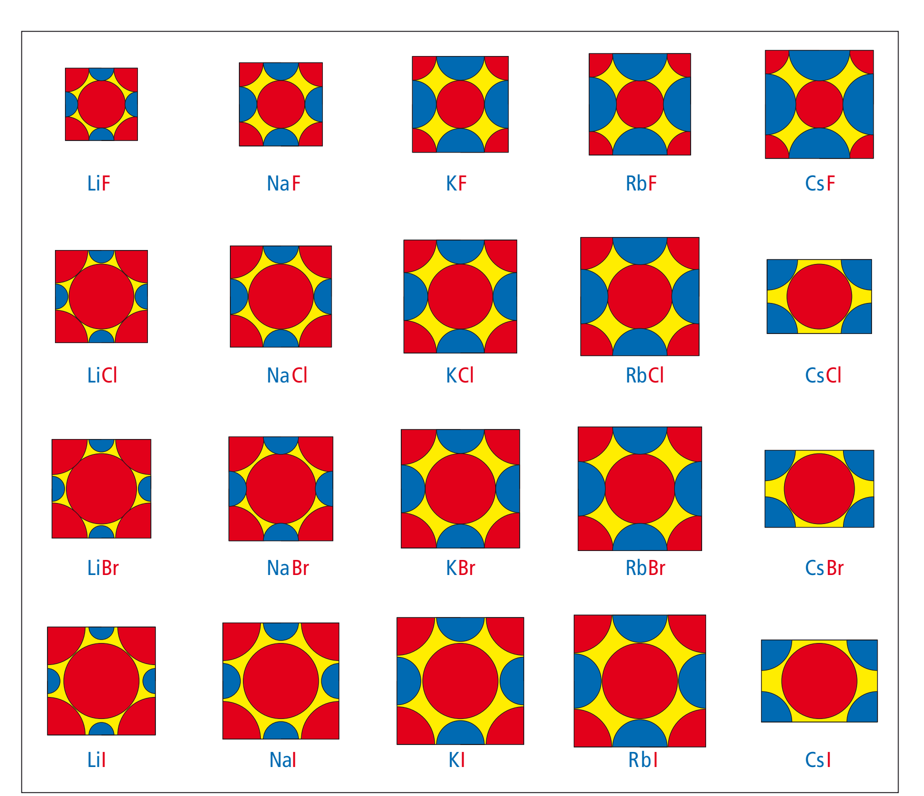
Dos variantes de iones

El cristal que nos resulta más familiar es la sal común, la forma cristalina del cloruro sódico (NaCl). Normalmente, interpretamos el cristal como un apilamiento de esferas sólidas de dos tipos: iones de sodio (Na^+) y de cloro (Cl^-). Los iones Na^+ se disponen en una red cúbica centrada en las caras (FCC). Los iones Cl^- forman otra, desplazada con respecto a la primera una longitud igual a media arista del cubo. Esta variedad se encuentra muy extendida, sobre todo en compuestos de sólo dos elementos. Se suele denominar halita o simplemente mediante la fórmula NaCl, si bien el cloruro sódico también se presenta en otras formas. Si consideramos los centros de todos los iones sin hacer distinción entre ellos, la halita no es más que una red cúbica simple y, por tanto, con número de coordinación igual a 6.

Consideremos ahora otros haluros alcalinos, formados por un metal alcalino (litio, sodio, potasio, rubidio o cesio) y un halógeno (flúor, cloro, bromo o yodo). Cada uno de los iones metálicos tiene un electrón de menos; los halógenos, uno de más, de manera que sus respectivas configuraciones electrónicas imitan a la de un gas noble (la más estable que existe). En tales compuestos, el enlace se debe casi exclusivamente a la fuerza de atracción electrostática entre las cargas. Las fuerzas de Van der Waals no desempeñan ninguna función relevante.



2. EN ESTA TABLA PERIODICA se muestran las celdas de Wigner-Seitz más habituales a presión y temperatura próximas a las ambientales. Las esferas circunscritas representan "átomos duros".



3. SECCIONES DE CRISTALES de haluros alcalinos en una misma escala. Los cuadrados se corresponden con las caras de los cubos en una red de tipo halita. Los rectángulos representan secciones a través de dos aristas y dos diagonales de las caras del cubo en una red CsCl. Para cada enlace sólo se muestra la forma más común en la naturaleza. Los lados de cuadrados y rectángulos muestran una relación muy aceptable con los valores experimentales (bastante precisos) de los parámetros de red.

Casi todos los haluros alcalinos dan lugar a cristales de tipo halita. Muchos de ellos, no obstante, forman también redes cúbicas de otros tipos (como hacen todos los haluros de cesio, excepto el CsF). En este tipo de red, con número de coordinación 8 y denominada de forma genérica CsCl, cada tipo de iones forma una red cúbica elemental que se encuentra desplazada media diagonal del cubo con respecto a la otra. En conjunto, forman una red cúbica centrada en el cuerpo (BCC), con una de las variantes en la posición de los vértices y la otra, en los centros (el reparto de roles es indiferente).

								He 2
			B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
			Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86

0 — 1
Nanómetro

Asumamos ahora que un ion (Na^+, por ejemplo) tiene siempre el mismo tamaño, con independencia de si forma un cristal de NaCl, uno de NaI, o un cristal de sodio metálico, donde los iones se hallan inmersos en un gas de electrones. Esta hipótesis, si bien algo ingenua, funciona de manera razonable, al menos en el caso de un cristal de iones.

El modelo de esferas sólidas requiere algún matiz. Imaginemos una pelota de tenis de superficie muy mullida. Una medición del diámetro arrojará resultados diferentes si se realiza a partir de la proyección de la sombra o con un pie de rey. En este último caso, además, el valor dependerá de la fuerza aplicada.

Las nubes electrónicas de átomos o iones no tienen una extensión definida. Pero, en un enlace químico entre átomos, existen mínimos de energía para determinadas distancias entre los centros, denominadas “distancias de enlace”. En el modelo de esferas sólidas, se trataría simplemente de la suma de los radios respectivos. Las distancias de enlace se determinan mediante experimentos de interferencia, especialmente para establecer los parámetros de red en un cristal. En cambio, los radios de los átomos y de los iones no pueden precisarse con exactitud (debido, justamente, a que no se trata de esferas sólidas).

En el caso de los haluros alcalinos mostrados en la figura 3, hemos adaptado los radios iónicos que figuran en las tablas (y no exentos de contradicciones) de manera que los valores concuerden entre sí y con los parámetros de red. Todos los iones de una misma clase se representan con el mismo tamaño. Como vemos, la aproximación funciona bastante bien, al menos en el caso de los haluros alcalinos.

El juego de la vida

Un clásico de John Conway popularizado por Martin Gardner

Agustín Rayo

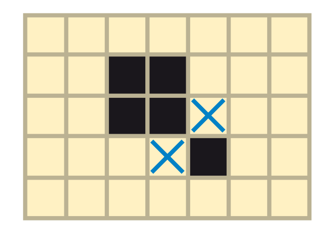
Piense en el vuelo de un águila o en el nacimiento de un elefante. Aunque sabemos que semejantes maravillas de la naturaleza son el resultado de la selección natural, no deja de resultar asombroso que organismos tan complejos como los seres vivos hayan surgido sin la ayuda de un "diseñador". ¿Cómo es posible que un águila o un elefante sean el resultado de mutaciones aleatorias y de una competición por la supervivencia? El *juego de la vida*, creado por el matemático John Conway, ahora en la Universidad de Princeton, quizá nos ayude a entenderlo algo mejor.

El mundo del juego consiste en una cuadrícula infinita. En este mundo habitan fichas que viven en alguna de las celdas de la cuadrícula. Aunque puede haber celdas vacías, no se permite que haya más de una ficha por celda.

El mundo evoluciona con el paso del tiempo: hay fichas que "nacen", otras que "mueren" y otras que "sobreviven". Las reglas son muy sencillas. Cada vez que transcurre una unidad de tiempo (un tic del reloj) el mundo evoluciona de acuerdo con los tres principios siguientes:

Nacimientos: Nacerá una ficha en cualquier celda vacía que tenga tres fichas vecinas (cada celda cuenta con ocho vecinos: dos a los lados, uno arriba, otro abajo y cuatro en diagonal).

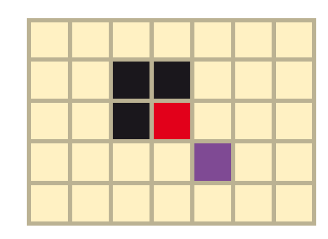
Supongamos, por ejemplo, que nuestro mundo contiene las fichas siguientes:



Al siguiente tic del reloj, habrá nacido una ficha en cada una de las dos celdas marcadas con una X azul.

Muertes: Existen dos causas de muerte: por sobrepoblación (morirá una ficha si a su alrededor hay cuatro o más fichas vecinas) y por aislamiento (morirán las fichas con sólo una o ninguna ficha vecina).

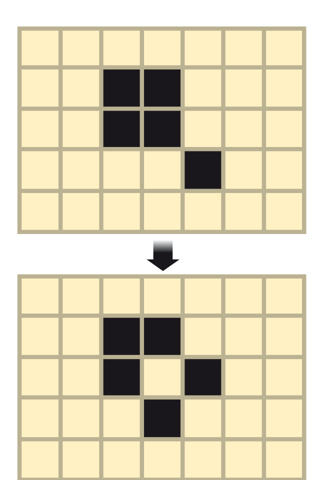
Volvamos a nuestro ejemplo:



Al próximo tic del reloj, la ficha roja morirá por sobrepoblación y la morada, por aislamiento. Las tres fichas restantes sobrevivirán.

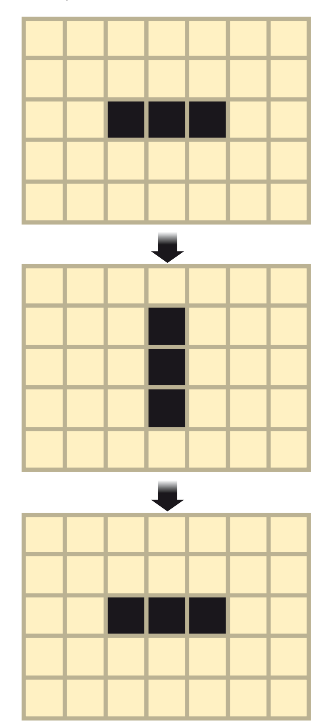
Supervivencia: Sobrevivirá cualquier ficha que no muera; es decir, aquellas con exactamente dos o tres fichas vecinas.

Los nacimientos, las muertes y la supervivencia ocurren al mismo tiempo, de manera que, tras un tic del reloj, nuestra configuración inicial se transformará de la siguiente manera:



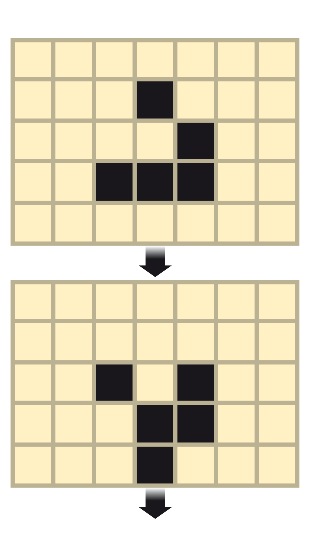
Una vez que el mundo haya alcanzado esa configuración permanecerá estable, pues todas las fichas satisfacen el criterio de supervivencia y ninguna celda vacía satisface el de nacimiento. (*Ejercicio para el lector:* Identifique otras configuraciones estables.)

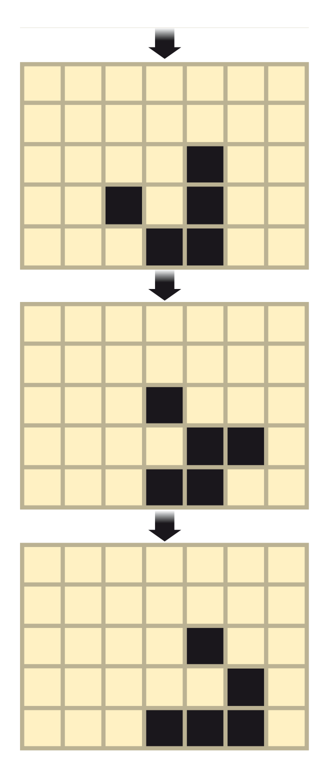
Pero hay configuraciones que no se estabilizan nunca. La siguiente, por ejemplo, corresponde a un oscilador. A cada tic del reloj se alternan la configuración horizontal y la vertical:



(*Ejercicio para el lector:* Identifique otras configuraciones oscilatorias.)

Mi configuración favorita es, sin duda alguna, el *planeador*, descubierto por Conway en 1970:





¡La figura se ha movido! Al cabo de cuatro tics hemos vuelto a la configuración original, pero trasladada una celda a la derecha y una hacia abajo.

Lo sorprendente del juego de la vida es que un conjunto de reglas tan sencillas baste para generar patrones tan interesantes. Los planeadores son tan simples que ocurren con muchísima frecuencia. Si uno distribuye fichas al azar sobre la cuadrícula (y si no están muy alejadas unas de otras), existe una probabilidad muy alta de que se genere al menos un planeador que inicie su recorrido hacia el infinito.

El juego de la vida se dio a conocer por primera vez en 1970, en la sección de "Juegos Matemáticos" de *Scientific American*, cuando la columna estaba a cargo de Martin Gardner [*véase Scientific American* 223, octubre de 1970]. Por aquel entonces, Conway sabía relativamente poco acerca del mundo que había creado, así que ofreció una recompensa de 50 dólares a quien lograse determinar si existía alguna configuración finita con la capacidad de crecer de manera indefinida.

El premio fue otorgado al mes siguiente, cuando Bill Gosper, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostró la existencia de una *pistola de planeadores*: una configuración que "dispara" un planeador tras cierto número de tics y que vuelve después a su posición original (*véase la figura inferior*). La pistola de Gosper consta de 36 fichas y dispara un planeador cada 30 tics (no se conoce ninguna pistola de menor tamaño).

Otra manera de generar configuraciones finitas con un crecimiento infinito es mediante una *locomotora de vapor:* una configuración que se traslada, al igual que un planeador, pero que deja atrás señales de "vapor". Hoy día se conocen muchos tipos diferentes de locomotoras.

Las pistolas y las locomotoras suelen ser bastante complejas. No sé de ninguna que haya sido generada de manera natural (a partir de una configuración inicial elegida al azar). Pero uno esperaría que, a partir de una "sopa primigenia" de fichas lo bastante grande, tarde o temprano acabarían por aparecer pistolas y locomotoras.

Aún mayor interés revisten las configuraciones autorreproductivas: figuras que generan copias de sí mismas, provocando un incremento neto de la población. Aunque por ahora nadie ha logrado construir ningún ejemplo, existe una demostración de que el juego de la vida ha de contener al menos una configuración autorreproductiva. Si alguien lograra construirla, habría creado el primer ser vivo en el juego de Conway. (Personalmente, encuentro atractivo pensar que las configuraciones sencillas, como los planeadores, constituyen el equivalente de los aminoácidos, las moléculas orgánicas básicas a partir de las cuales está construida la vida.)

El juego de la vida esconde otra propiedad de enorme interés: su complejidad es tal que le permite implementar programas de cómputo. Es más, resulta posible implementar *cualquier* programa que pueda computar un ordenador común. En 1982 Conway demostró que existe una configuración que opera a modo de máquina universal de Turing: puesta en movimiento, "ejecuta" el código de programación representado por otras configuraciones y "escribe" el resultado correcto sobre la cuadrícula. Conway también demostró que el juego contiene un *constructor universal:* una configuración que permite generar formas de muchísimos otros tipos.

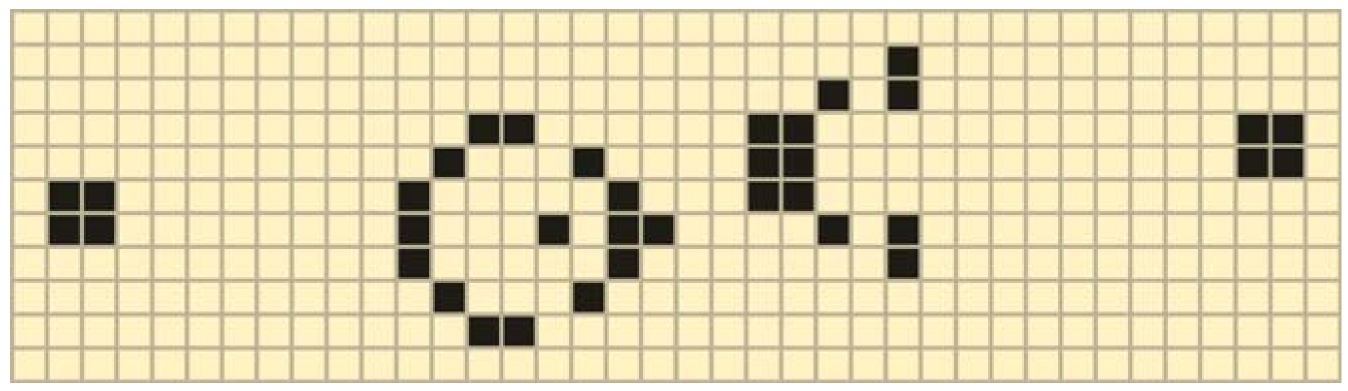
En 1970, cuando Martin Gardner dio a conocer los primeros resultados de Conway, no era sencillo disponer de un ordenador que lograse simular el juego de la vida (y las simulaciones que existían eran bastante lentas). Hoy día la situación es muy diferente. Le recomiendo que visite www.conwaylife.com y experimente por sí mismo con el fabuloso mundo de Conway. No deje de cargar los patrones preprogramados. Algunos son absolutamente espectaculares.

Agustín Rayo es investigador en el departamento de filosofía del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

¿Quiere saber más?

Un magnífico lugar para empezar es **www.conwaylife.com/wiki/**

Los resultados de Conway pueden encontrarse en *Winning ways for your mathematical plays*, por Berlekamp, Conway y Guy (segunda edición, vol. 4, AK Peters, 2001).



WIKIMEDIA COMMONS

LA PISTOLA DE GOSPER dispara un planeador cada 30 tics. Una animación de su funcionamiento puede verse en http://es.wikipedia.org/wiki/Juego_de_la_vida



EINSTEINS GEGNER. DIE ÖFFENTLICHE KONTROVERSE UM DIE RELATIVITÄTSTHEORIE IN DEN 1920ER JAHREN,

por Milena Wazeck. Campus; Frankfurt am Main, 2009.

Los detractores de Einstein

Razones para estar en contra de la teoría de la relatividad y su autor

La mayoría se reconocen de antemano por el sobre: envíos voluminosos de tamaño DIN–A4 con la dirección escrita a mano y los sellos minuciosamente alineados con el canto del sobre. Por fuera se indica: "Para la redacción de *Investigación y Ciencia*" o "A la atención del Director Editorial". Dentro, el remitente explica cómo resolver el problema del libre albedrío mediante la mecánica cuántica y el segundo principio de la termodinámica, o por qué la teoría de la relatividad es incorrecta. Nadie se atreve a exponer estos hechos. Excepto el defensor de los mismos, obviamente.

En su ensayo sobre historia de la ciencia, Milena Wazeck, licenciada en ciencias políticas, ha puesto nombre a este tipo de expertos: *Welträtsellöser* ("los descifradores del acertijo universal"). La autora ha revisado el legado del físico Ernst Gehrcke (1878-1960), recopilado en 2004. El que posteriormente sería director del departamento de óptica del Instituto Nacional de Física y Tecnología (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) destacó en los años veinte por ciertas publicaciones que criticaban la teoría de la relatividad y su popular aceptación; se convirtió en una figura de referencia para algunos críticos de Einstein. Le mandaron cartas, panfletos y recortes de periódico. El número de documentos de la colección de Gehrcke ascendió rápidamente a 5000, de los que se conservan todavía cerca de 2700. Una colección única que revela información sobre las razones y el trasfondo social e institucional de una postura en contra del autor de la teoría de la relatividad, que creció durante la incipiente república de Weimar.

Wazeck define a los *Welträtsellöser* como investigadores al margen de la ciencia académica que, sin embargo, son capaces de debatir con los catedráticos ya que cuentan con conocimientos del mismo nivel intelectual, la mayoría basados en sus propios "estudios". El análisis del legado de Gehrcke revela que entre los pasados oponentes de Einstein había sobre todo ingenieros, doctores y abogados, que desde distintas áreas y con argumentos en parte contradictorios intentaban poner su teoría de la relatividad en apuros. El principal empeño de estos "naturalistas independientes" era defender su propio conjunto de conocimientos ante la amenzante física moderna experimental. La mayoría defendían un concepto global del mundo desde el respeto por la naturaleza viva; algunos de ellos con una clara tendencia esotérica.

La autora describe de forma inteligente el contexto ideológico de aquel momento social, pero no profundiza hasta llegar a su padrino espiritual: Johann Wolfgang von Goethe. A la repercusión de la idea goethiana de naturaleza en la historia del pensamiento, expuesta en "*La metamorfosis de las plantas*" o la "*Teoría de los colores*", le debemos los conceptos holísticos utilizados para explicar la naturaleza, que consideran la metodología matemática y experimental de las ciencias naturales actuales un elemento destructivo contrario a la vida. Las obras de los escritores —y médicos— Gottfried Benn y Alfred Döblin, contemporáneos de Einstein, constituyen un testimonio elocuente de ello.

Muchos de los detractores de Einstein ni siquiera llegaron a entender la teoría de la que se manifestaban en contra en sus escritos. Con el tiempo, sus diatribas adquirieron una nueva perspectiva, ofendidos por haber sido ignorados y activamente excluidos por Einstein y los círculos en los que éste se movía. Para documentar este hecho, Wazeck incluye muchas otras fuentes además del legado de Gehrcke. Logra así que cobre vida el conflicto que algunos colegas de oficio mantenían con Einstein, públicamente o por correo.

Sin embargo, la autora deja completamente a un lado el panorama político y social del período sobre el que escribe. Ello resulta una considerable deficiencia, tratándose de los años posteriores a 1919, cuando de pronto Einstein se hizo famoso a nivel mundial después de que la Royal Society observara el eclipse solar que tuvo lugar ese año. Muchos contemporáneos no estaban en contra de la teoría de la relatividad, sino también en contra de que su autor fuera judío y, por si fuera poco, de izquierdas. Cada año aumentaban las críticas que recriminaban el hecho de que Einstein fuera elogiado por los medios de comunicación liberales de izquierdas y de que hiciera "propaganda" de una concepción del mundo relativista, peligrosa para la sociedad. Los detractores de Einstein hacían referencia implícita —en algunos casos también explícita— y sin venir al caso, a textos como los "*Protocolos de los sabios de Sión*", los inventados panfletos propagandísticos antisemitas que, poco después de la primera Guerra Mundial, se publicaron en periódicos y publicaciones con diferentes ediciones. Ante estas circunstancias, llegó a considerarse al físico como el protagonista de una "conspiración judía-bolchevique".

La física se vio involucrada en las luchas ideológicas del panorama político de la inestable primera república alemana. El mismo Einstein se convirtió en el enemigo preferido de ultraconservadores, nacionalistas y nacionalsocialistas.

Aunque de la "controversia pública sobre la teoría de la relatividad en los años veinte" (subtítulo del libro) falte una parte crucial, el análisis cuidadoso de las campañas contra Einstein por parte de los *Welträtsellöser* y algunos colegas de oficio completan nuestra imagen del contexto del debate anti-Einstein de aquella época.

Carsten Könneker



TECNICAS EN HISTOLOGIA Y BIOLOGIA CELULAR.
Dirigido por L. Montuenga, F. J. Esteban y A. Calvo.
Elsevier Masson; 2009.

Biología en el laboratorio

Del microscopio óptico a las células madre

Pocas son las obras sobre técnicas histológicas cuyos originales proceden de investigadores españoles, desde Ramón y Cajal hasta nuestros días. En cambio, en otros países como Francia, Alemania e Inglaterra, se han ido publicando obras sobre metodología que han guiado e inspirado a un buen número de científicos y de las cuales se han realizado numerosas traducciones y reimpresiones. Entre otras, recordamos las magnas obras de Romeis, Locquin, Langeron y Martoja.

Por todo ello, es una gran satisfacción disponer de una obra como la coordinada por los profesores Luis Montuenga, Francisco J. Esteban y Alfonso Calvo, profesores de las Universidades de Navarra y de Jaén, que junto con otros colaboradores de dichas universidades han publicado *Técnicas en Histología y Biología Celular*.

Una obra no tiene por qué ceñirse a Bolonia (que ha significado una poda notable de los planes de estudio). Una obra debe ser polivalente, no debe renunciar a la incorporación de aspectos para algunos superfluos. Este comentario surge al leer el título del primer capítulo: "Introducción histórica a la biología celular y la histología". Muchos somos quienes consideramos que, para comprender con exactitud el nivel de conocimientos que hemos alcanzado a inicios del siglo XXI, debemos conocer, aunque sea ligeramente, el camino que nos ha conducido a la situación actual. Cualquier obra que se precie debe empezar con una introducción histórica de la materia motivo de estudio. En este caso se ha sintetizado el proceso histórico en veintitrés páginas que no tienen desperdicio.

El capítulo 2 se centra en "El microscopio óptico: fundamentos y tipos". Se evidencia el modo en que este sistema óptico no será nunca obsoleto; será siempre un instrumento imprescindible para abordar cualquier tema relacionado con la célula y los tejidos. Rentabilizar el instrumento implica conocer sus fundamentos y saber seleccionar la combinación óptica adecuada para cada tipo de estudio. Si bien en la actualidad existen grandes estativos de microscopios que se utilizan para la investigación que se han automatizado considerablemente, numerosos científicos prefieren todavía disponer de cierta autonomía y tener un grado de libertad suficiente para obtener el máximo rendimiento del aparato. Cabe recordar que cualquier trabajo ultraestructural requiere un estudio previo con el microscopio óptico, para no perderse en el análisis de las imágenes que nos ofrecerá la microscopía electrónica. Acompaña el texto una iconografía excelente y demostrativa de lo que nos ofrecerá el microscopio tras aplicar las técnicas tintoriales que se explican en el siguiente capítulo.

En el tercero y cuarto capítulo se detallan las etapas del protocolo a seguir, desde la fijación inicial de las muestras hasta el montaje de la preparación. Las técnicas seleccionadas son las más básicas y las más aplicadas en los laboratorios de histología normal y patológica. Se reservan las técnicas citoquímicas e histoquímicas para el cuarto capítulo. La selección de imágenes es magnífica.

Las técnicas inmunocitoquímicas y las técnicas de localización *in situ* de los ácidos nucleicos, con la preparación de los distintos tipos de sondas y su marcaje, constituyen los capítulos quinto y sexto. En este último se habla de la problemática de la aplicación de las técnicas del FISH en el diagnóstico citogenético en humanos, así como de las técnicas que derivan de ella. Se explican con detalle la microscopía confocal y su fundamento, así como la preparación más adecuada de las muestras que deben analizarse con él. Se introducen también las nuevas técnicas en microscopía de alta resolución, como el microscopio multifotónico.

En el capítulo octavo se da entrada a la microscopía electrónica de transmisión y de barrido: fundamentos físicos y protocolos habituales en la preparación de las muestras biológicas. Acompañan a las explicaciones esquemas altamente didácticos e imágenes ultraestructurales muy demostrativas.

El análisis y estudio de la información que alberga una imagen estructural o ultraestructuctural, cómo rentabilizar dicha información y cómo expresarla constituyen el núcleo del capítulo noveno. En el décimo se explican con claridad los métodos estereológicos, con ejemplos y gráficos muy bien seleccionados. Proliferación, muerte celular y angiogénesis en patología tumoral centran el capítulo 12. Por fin, el decimotercer y último capítulo se dedica a la ingeniería de tejidos y las células madre.

Cabe señalar que la mayoría de los capítulos cuentan con una relación bibliográfica selecta y concisa, así como con un cuestionario que permite evaluar la comprensión del texto.

Esta obra puede ir destinada a estudiantes de grado y de máster, así como a doctorandos y profesionales del ámbito de las ciencias biomédicas preferentemente, y además a los técnicos de laboratorios de investigación citológica y de anatomía patológica.

Para terminar, añadiremos una frase de gran calado: "no se enseña bien sino lo que se hace y quien no investiga no enseña a investigar" (Santiago Ramón y Cajal). De ahí que el libro presentado no deje lugar a duda de que sus autores son excelentes docentes y buenos investigadores, y por ello ofrecen su experiencia sembrándola de manera didáctica, conscientes de que "en el campo de la observación, la oportunidad solamente favorece a la mente más preparada" (Louis Pasteur).

Mercè Durfort

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2010*

TITULOS

AUTORES

EN EL NUMERO DE ENERO 2011

RENOVAMOS EL DISEÑO Y AMPLIAMOS CONTENIDOS



Desde 1976, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA *viene divulgando con claridad y rigor el desarrollo de la ciencia. Con el propósito de seguir ofreciendo a nuestros lectores una publicación actual y completa, a partir del próximo número la revista estrena diseño y secciones:*

FILOSOFIA DE LA CIENCIA
Cuestiones filosóficas. Intrínsecas y fundamentales para el desarrollo de la ciencia.

FORO CIENTIFICO
La opinión de los expertos. Análisis y reflexión sobre temas científicos de interés y relevancia social.

HISTORIA DE LA CIENCIA
Conocer el pasado nos ayuda a comprender el presente.

AGENDA
Exposiciones, conferencias, talleres y otras actividades de divulgación científica.

Y como siempre...

CARTAS DE LOS LECTORES
APUNTES
PANORAMA
DE CERCA
CIENCIA Y GASTRONOMIA
JUEGOS MATEMATICOS
TALLER Y LABORATORIO
CURIOSIDADES DE LA FISICA
LIBROS
HACE...

Le invitamos a seguir compartiendo con nosotros la pasión por la ciencia, la innovación y el conocimiento.

WWW.INVESTIGACIONYCIENCIA.ES